

Universitat Politècnica de Catalunya  
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona

ETSAB – UPC



Trabajo Final de Máster MBArch – AEMA  
Arquitectura Energia i Medi Ambient

# DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO ENERGÉTICO DE LA FACHADA VENTILADA

Autor:

**Oriol Roig Mayoral**

Orcid 0000-0001-8402-4760

Directora:

**Dra. Cristina Pardal March**

Orcid 0000-0002-7912-1192

Codirectores:

**Dr. Antonio Isalgue Buxeda**

Orcid 0000-0002-4354-5831

ResearcherID M-2459-2014

Scopus Author ID 7004080030

**Dr. Ignacio Paricio Ansuategui**

Barcelona, 28 de Septiembre de 2017





## **RESUMEN**

Este trabajo se enmarca en el contexto de un proyecto de mayor alcance que tiene como objetivo conocer en detalle el funcionamiento energético de la fachada ventilada, para poder guiar en su diseño y ejecución.

En concreto, el trabajo busca demostrar que la normativa energética obvia parámetros que sí tienen influencia en el funcionamiento energético. Para ello, era necesario entender la influencia de cada uno de sus parámetros definitorios, para posteriormente desarrollar una herramienta que los tuviera en cuenta y sirviera para calcular el flujo energético a través del cerramiento.

En una fase previa se han analizado diversos artículos sobre la fachada ventilada así como también los principios físicos que están implicados en ello. Esta información ha servido de base para el desarrollo de la herramienta de cálculo que se puede usar para dar valores a la afectación de cada uno de los parámetros considerados. En versiones posteriores de la herramienta se podrán implementar más posibilidades de variación de parámetros.

En la última parte del estudio se muestra algún ejemplo sencillo de aplicación de la herramienta. Se ha comparado la influencia de algunos parámetros en dos situaciones climáticas opuestas en Barcelona: fachada soleada en verano y noche despejada de invierno. Estos ejemplos han permitido demostrar que además de los parámetros que considera la normativa energética, hay otros que pueden tener influencia; y que una fachada ventilada sólo funcionará mejor que una fachada no ventilada o sin cámara si se han tenido en cuenta.



## **AGRADECIMIENTOS**

*A los responsables de mantenimiento de la Illa Diagonal, que nos han abierto sus puertas y nos han acompañado muy amablemente durante largas jornadas de medición: Lluís M. Pichel, Francisco Vizcaíno, Juan Solsona, Antonio Martínez, Jose Manuel Ortiz.*

*A los profesores Helena Coch y Toni Isalgue por sus referencias y consejos durante la dura etapa de investigación y formulación.*

*Al profesor Eugenio Salvatierra, por sentar las bases de mi espíritu investigador desde el instituto.*

*A los profesores Cristina Pardal e Ignacio Paricio, por sus consejos y apoyo tan valiosos, por su disponibilidad y dedicación durante todo el proceso, y por su visión crítica y carácter pedagógico.*

*A Elisa, porque sin ella todo sería de otro color.*

*A mis padres, que me han enseñado el valor del esfuerzo y siempre me han motivado a seguir adelante.*

*A Tere, por todo su apoyo y comprensión, y por acompañarme tanto en los buenos como en los malos momentos.*



*“Until you can measure something and express it in numbers, you have only the beginning of understanding.” – Lord Kelvin*

*“To measure is to know. If you cannot measure it, you cannot improve it.” – Lord Kelvin*

*“Measure what is measurable, and make measurable what is not so.” – Galileo Galilei*





## **SUMARIO**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>- 21 -</b>
1.1.	Origen y evolución de la fachada ventilada.....	- 21 -
1.2.	Aplicación y uso de la fachada ventilada.....	- 23 -
1.3.	Objetivos y metodología .....	- 24 -
<b>2.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE - NORMATIVA.....</b>	<b>- 26 -</b>
2.1.	La fachada y su orientación según el CTE.....	- 26 -
2.2.	Seguridad frente incendios, según CTE DB SI y Ordenança Municipal de Barcelona.....	- 26 -
2.3.	Ventilación y salubridad, según CTE DB HS .....	- 27 -
2.4.	Ventilación y ahorro de energía, según CTE DB HE / 1.....	- 30 -
2.5.	Justificación como solución técnica alternativa: DITE o ETAG .....	- 33 -
<b>3.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE – ESTUDIOS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO ENERGÉTICO.....</b>	<b>- 35 -</b>
3.1.	Clasificaciones de los estudios.....	- 35 -
3.1.1.	<i>Origen de los datos.....</i>	- 35 -
3.1.2.	<i>Simplificaciones .....</i>	- 35 -
3.1.3.	<i>Aspectos analizados .....</i>	- 36 -
3.1.4.	<i>Comparaciones.....</i>	- 36 -
3.1.5.	<i>Análisis de variación parámetros .....</i>	- 36 -
3.2.	Detalles de algunos estudios .....	- 37 -
3.3.	Puntos en común entre los estudios .....	- 39 -
3.4.	Flujos de aire inducidos en la cámara y fachadas PER ( <i>Pressure Equalized Rainscreen</i> ) .....	- 39 -
<b>4.</b>	<b>CONCEPTOS Y TERMINOLOGÍA .....</b>	<b>- 41 -</b>
4.1.	Tipologías de fachada .....	- 41 -
4.2.	Clasificación tipológica de las fachadas ventiladas según su función .....	- 42 -
4.2.1.	<i>Protección de la lluvia .....</i>	- 42 -
4.2.2.	<i>Protección de la radiación solar .....</i>	- 42 -
4.2.3.	<i>Compositiva.....</i>	- 44 -
4.3.	Clasificación tipológica de las fachadas ventiladas según el reparto de las aberturas en la hoja exterior.....	- 46 -
4.3.1.	<i>Fachadas ventiladas de junta abierta - OJVF .....</i>	- 47 -
4.3.2.	<i>Fachadas ventiladas de junta cerrada - CJVF.....</i>	- 48 -
4.3.3.	<i>Tipologías intermedias .....</i>	- 48 -
4.3.4.	<i>Circulación del aire en función del reparto de las aberturas .....</i>	- 49 -
<b>5.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE FLUJOS ENERGÉTICOS Y MOVIMIENTO DEL AIRE.....</b>	<b>- 51 -</b>

5.1.	Bases del estudio energético.....	- 51 -
5.2.	Flujos energéticos en cada una de las caras.....	- 54 -
5.2.1.	<i>Ganancias energéticas de <math>M_1</math></i> .....	- 54 -
5.2.2.	<i>Pérdidas energéticas de <math>M_1</math> y ganancias energéticas de <math>M_2</math></i> .....	- 55 -
5.2.3.	<i>Pérdidas energéticas de <math>M_2</math> y ganancias energéticas de <math>M_3</math></i> .....	- 56 -
5.2.4.	<i>Pérdidas energéticas de <math>M_3</math> y ganancias energéticas de <math>M_4</math></i> .....	- 57 -
5.3.	Desarrollo numérico de cada uno de los tipos de flujo energético .....	- 57 -
5.3.1.	<i>Radiación de onda corta</i> .....	- 58 -
5.3.2.	<i>Radiación de onda larga</i> .....	- 58 -
5.3.3.	<i>Conducción, a través de sólidos</i> .....	- 59 -
5.3.4.	<i>Convección, entre un sólido y el aire en contacto</i> .....	- 59 -
<b>6.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA</b> .....	<b>- 60 -</b>
6.1.	Balance energético de cada una de las superficies .....	- 60 -
6.1.1.	<i>Balance 0 de la superficie <math>M_1</math></i> .....	- 60 -
6.1.2.	<i>Balance 0 de <math>M_2</math></i> .....	- 62 -
6.1.3.	<i>Balance 0 de <math>M_3</math></i> .....	- 64 -
6.2.	Cálculo de $T_i$ .....	- 64 -
6.2.1.	<i>Calentamiento de aire en contacto con dos superficies más calientes, a temperatura constante</i> .....	- 66 -
6.3.	Cálculo de $V_i$ y la renovación del aire de la cámara .....	- 70 -
6.3.1.	<i>Efecto chimenea</i> .....	- 70 -
6.3.2.	<i>Renovación de aire en las juntas debida al viento sobre una OJVF</i> .....	- 75 -
6.4.	Desfase térmico de $M_1$ a $M_2$ .....	- 76 -
6.4.1.	<i>Desarrollo numérico</i> .....	- 77 -
6.4.2.	<i>Ejemplos</i> .....	- 77 -
6.5.	Explicación de la hoja de cálculo .....	- 78 -
6.5.1.	<i>Pestaña "intro"</i> .....	- 78 -
6.5.2.	<i>Pestaña "k"</i> .....	- 83 -
6.5.3.	<i>Pestaña "Pn"</i> .....	- 83 -
6.5.4.	<i>Pestaña "it-Pn"</i> .....	- 85 -
6.5.5.	<i>Ejemplo de aplicación</i> .....	- 86 -
6.6.	Limitaciones de la herramienta .....	- 86 -
<b>7.</b>	<b>APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA</b> .....	<b>- 88 -</b>
7.1.	Fachada base y parámetros climáticos.....	- 88 -
7.2.	Espesor de cámara y tipologías de fachada .....	- 90 -
7.3.	Análisis de resultados 1 .....	- 90 -
7.4.	Otros parámetros .....	- 92 -

7.5.	Análisis de resultados 2 .....	- 93 -
7.6.	Análisis de resultados 3 .....	- 94 -
7.7.	Análisis de resultados 4 .....	- 98 -
8.	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>- 100 -</b>
9.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>- 101 -</b>



## **LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS**

<b>Figura 1:</b> Ejemplo de cavity wall en de Casa 1101 de HArquitectes. Fuente: ph1 Adrià Goula, ph2 HArquitectes.....	- 21 -
<b>Figura 2:</b> Aberturas de ventilación de tabiques pluviales. Fuente: elaboración propia .....	- 21 -
<b>Figura 3:</b> Fachada de hoja exterior discontinua en UB Barcelona. Fuente: elaboración propia ...	- 22 -
<b>Figura 4:</b> Detalles de ejemplos de fachadas de hoja exterior discontinua (OJVF). Fuente: Butech, PORCELANOSA Grupo .....	- 22 -
<b>Figura 5:</b> Ejemplos de fachadas ventiladas de colores variados. Fuente: Trespa .....	- 23 -
<b>Figura 6:</b> Fachada ventilada prefabricada de madera sobre soporte de CLT, Escuela Waldorf. Fuente: BH arquitectura.....	- 23 -
<b>Figura 7:</b> Ejemplo de rehabilitación energética con fachada ventilada. Fuente: Ulma Architectural Solutions.....	- 24 -
<b>Figura 8:</b> Orientación de las fachadas. Fuente: CTE DB HE .....	- 26 -
<b>Figura 9:</b> Tabla de clasificación de los materiales constructivos según su comportamiento al fuego, según el CTE DB SI. Fuente: Knauf .....	- 27 -
<b>Figura 10:</b> Ejemplo de fachada ventilada representada por el CTE (tabique pluvial en Barcelona) y de fachada ventilada de hoja exterior discontinua (Illa Diagonal, Barcelona). Fuente: elaboración propia .....	- 28 -
<b>Figura 11:</b> Gráfico de comparación de porcentajes de perforación entre límites del CTE DB HS y ejemplo de hoja exterior discontinua, Illa Diagonal de Barcelona. Fuente: elaboración propia...	- 29 -
<b>Figura 12:</b> Resistencias térmicas de cámaras de aire en $m^2K/W$ . Fuente: CTE DB HE/1, Tabla 2 del punto 2.1.1 .....	- 30 -
<b>Figura 13:</b> Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en $m^2K/W$ . Fuente: CTE DB HE/1, Tabla 1 del punto 2.1.1 .....	- 31 -
<b>Figura 14:</b> Comparación de la transmitancia térmica U según CTE DB HE en 3 fachadas con hoja exterior distinta, diferentes grosores de cámara y diferentes grados de ventilación. Fuente: elaboracion propia .....	- 32 -
<b>Figura 15:</b> Gráfico de límites entre diferentes grados de ventilación según el CTE DB HE. Fuente: elaboración propia .....	- 33 -
<b>Figura 16:</b> Taxonomía de fachadas en función de la forma del material de la hoja de soporte y el mecanismo de estanqueidad al agua de lluvia. Fuente: facad3s.net .....	- 41 -

<b>Figura 17:</b> Revestimiento de lamas de madera con juntas muy abiertas, en Centre Cívic Pere Quart, Barcelona. Fuente: elaboración propia.....	43 -
<b>Figura 18:</b> Ejemplos de fachadas vegetales: Caixaforum de Madrid, de Herzog & de Meuron con Patrick Blanc, y vivienda particular en Barcelona. Fuente: ph1 Óscar Carnicero Sánchez, ph2 elaboración propia .....	44 -
<b>Figura 19:</b> New Museum of Contemporary Art, de Sanaa, en Nueva York como ejemplo de fachada de hoja exterior de deployé. Fuente: Maciek Lulko, Peter Guthrie y John Zacherle	44 -
<b>Figura 20:</b> Fotografías de las antiguas oficinas de Carbueros Metálicos. Fuente: B01 arquitectes (fotografía general), Cristina Pardal (fotografía detalle).....	45 -
<b>Figura 21:</b> Detalles de la fachada de las antiguas oficinas de Carbueros Metálicos. Fuente: B01 arquitectes .....	45 -
<b>Figura 22:</b> Muestras de los acabados de paneles exteriores de fachada ventilada. Fuente: Trespa .....	46 -
<b>Figura 23:</b> Revestimiento perforado con motivos florales en el centro de tecnología y cultura de Tonghua con el sistema Trespa Meteon. Fuente: Trespa .....	46 -
<b>Figura 24:</b> Clasificación de las fachadas en función del reparto de las perforaciones en la hoja exterior: NVF, CJVF y OJVF respectivamente. Fuente: Cristina Pardal .....	47 -
<b>Figura 25:</b> Ejemplos de OJVF en Barcelona. Fuente: elaboración propia .....	47 -
<b>Figura 26:</b> Ejemplo de CJVF, Facultad de Ciencias de la UAB. Fuente: Julieta Balter .....	48 -
<b>Figura 27:</b> Ejemplos de distintos tipos de junta. Fuente: Trespa .....	48 -
<b>Figura 28:</b> Ejemplo de morfología intermedia OJVF-CJVF, Edificio Omega UPC. Fuente: elaboración propia .....	49 -
<b>Figura 29:</b> Caudales en juntas y en cámara en: OJVF, CJVF y tipología intermedia respectivamente. Fuente: elaboración propia .....	49 -
<b>Figura 30:</b> Denominación de cada una de las caras de la fachada ventilada. Fuente: elaboración propia .....	51 -
<b>Figura 31:</b> Imagen resumen de los aportes energéticos y flujos de aire en fachada soleada. Fuente: elaboración propia .....	52 -
<b>Figura 32:</b> Imagen resumen de los aportes energéticos y flujos de aire en fachada no soleada con interior calefactado. Fuente: elaboración propia .....	53 -
<b>Figura 33:</b> Ganancias energéticas de $M_1$ . Fuente: elaboración propia .....	54 -
<b>Figura 34:</b> Pérdidas energéticas de $M_1$ y sus relativas ganancias energéticas de $M_2$ . Fuente: elaboración propia .....	55 -

<b>Figura 35:</b> Pérdidas energéticas de $M_2$ y sus relativas ganancias energéticas de $M_3$ . Fuente: elaboración propia .....	- 56 -
<b>Figura 36:</b> Pérdidas energéticas de $M_3$ y ganancias energéticas de $M_4$ . Fuente: elaboración propia .....	- 57 -
<b>Figura 37:</b> Esquema de flujos energéticos de la superficie $M_1$ . Fuente: elaboración propia .	- 60 -
<b>Figura 38:</b> Emisión desde una porción diferencial de superficie hacia una hipotética semiesfera centrada en dicho diferencial de sup. Fuente: Fundamentals of heat and mass transfer, figura 12.9. Incropera-Bergman-Lavine-Dewitt.....	- 61 -
<b>Figura 39:</b> Comparación en la distribución direccional de la emisión de un cuerpo negro y de una superficie real. Fuente: Fundamentals of heat and mass transfer, figura 12.15. Incropera-Bergman-Lavine-Dewitt .....	- 61 -
<b>Figura 40:</b> Esquema de flujos energéticos de la superficie $M_2$ . Fuente: elaboración propia .	- 62 -
<b>Figura 41:</b> Esquema de reflexiones entre $M_2$ y $M_3$ . Fuente: elaboración propia.....	- 63 -
<b>Figura 42:</b> Esquema de flujos energéticos de la superficie $M_3$ . Fuente: elaboración propia .	- 64 -
<b>Figura 43:</b> Esquema de la hipótesis de circulación de aire considerada, en la parte inferior de la fachada. Fuente: elaboración propia .....	- 65 -
<b>Figura 44:</b> Gráfico cualitativo de la temperatura de un fluido en función del tiempo que lleva en contacto dos superficies a temperatura constante. Fuente: elaboración propia .....	- 67 -
<b>Figura 45:</b> Esquema de la combinación de flujos generados por la diferencia de temperatura del aire de la cámara detrás de cada una de las placas. Fuente: elaboración propia .....	- 71 -
<b>Figura 46:</b> Asimilación de las resistencias de cámara a las de un circuito eléctrico. Fuente: elaboración propia .....	- 72 -
<b>Figura 47:</b> Fluido viscoso entre dos placas, una de ella en movimiento. Fuente: Física para la ciencia y la tecnología, Tipler-Mosca .....	- 72 -
<b>Figura 48:</b> Relación de alturas entre parábola y rectángulo de misma base y superficie. Fuente: elaboración propia .....	- 73 -
<b>Figura 49:</b> Esquema de la fachada ventilada como asimilación a un circuito eléctrico. Fuente: elaboración propia .....	- 74 -
<b>Figura 50:</b> Caudales en diferentes puntos de una OJVF según la hoja de cálculo utilizada. Fuente: elaboración propia .....	- 75 -
<b>Figura 51:</b> Pestañas de la hoja de cálculo. Fuente: elaboración propia.....	- 78 -
<b>Figura 52:</b> Esquema de la pestaña “intro”. Fuente: elaboración propia .....	- 78 -
<b>Figura 53:</b> Pestaña “intro” de la hoja de cálculo. Fuente: elaboración propia .....	- 80 -

<b>Figura 54:</b> Esquema los gráficos de funcionamiento del conjunto de la fachada, situados en la parte inferior de la pestaña “intro”. Fuente: elaboración propia .....	- 81 -
<b>Figura 55:</b> Gráficos de funcionamiento del conjunto de la fachada, situados en la parte inferior de la pestaña “intro”. Fuente: elaboración propia .....	- 82 -
<b>Figura 56:</b> Esquema de la pestaña “k”. Fuente: elaboración propia .....	- 83 -
<b>Figura 57:</b> Esquema de la pestaña “Pn”. Fuente: elaboración propia .....	- 83 -
<b>Figura 58:</b> Versión desplegada de la pestaña “Pn”. Fuente: elaboración propia .....	- 84 -
<b>Figura 59:</b> Versión de visualización de resultados de la pestaña “Pn”. Fuente: elaboración propia .....	- 85 -
<b>Figura 60:</b> Esquema de la pestaña “it-Pn”. Fuente: elaboración propia.....	- 85 -
<b>Figura 61:</b> Pestaña “it-Pn” de la hoja de cálculo. Fuente: elaboración propia .....	- 86 -
<b>Figura 62:</b> Imagen resumen de los datos considerados para el ejemplo de aplicación. Fuente: elaboración propia .....	- 89 -
<b>Figura 63:</b> Esquemas de las fachadas simuladas. Fuente: elaboración propia .....	- 90 -
<b>Figura 64:</b> Afectación de la variación del espesor de cámara sobre el flujo energético en cinco tipologías de fachada. Fuente: elaboración propia.....	- 91 -
<b>Figura 65:</b> Afectación de las variaciones de diversos parámetros sobre el flujo energético en una OJVF-c60-j7. Fuente: elaboración propia .....	- 93 -
<b>Figura 66:</b> Afectación de las variaciones de diversos parámetros sobre el flujo energético en cinco tipologías de fachada, sin viento. Fuente: elaboración propia.....	- 95 -
<b>Figura 67:</b> Afectación de las variaciones de diversos parámetros sobre el flujo energético de cinco tipologías de fachada, con viento. Fuente: elaboración propia .....	- 96 -
<b>Figura 68:</b> Esquema situando en la figura anterior diversos ejemplos de fachadas NVF o SC (en azul) que funcionan mejor que algunas VF (en rojo). Fuente: elaboración propia .....	- 97 -



## **LISTADO DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS**

CTE	Código Técnico de la Edificación
CTE DB HE	Código Técnico de la Edificación – Documento Básico – Ahorro de energía
CTE DB HS	Código Técnico de la Edificación – Documento Básico – Salubridad
CTE DB SI	Código Técnico de la Edificación – Documento Básico – Seguridad en caso de incendio
DITE	Documentos de Idoneidad Técnica Europeos (ver ETAG)
ETAG	European Technical Approval Guideline (ver DITE)

VF	Ventilated Facade
NVF	Non-Ventilated Facade
OJVF	Open Joint Ventilated Facade
CJVF	Closed Joint Ventilated Façade

CFD	Computational Fluid Dynamics
-----	------------------------------

PER	Pressure Equalized Rainscreen
-----	-------------------------------

M <sub>1</sub>	Cara exterior de la hoja exterior
M <sub>2</sub>	Cara interior de la hoja exterior
M <sub>3</sub>	Cara exterior de la hoja interior
M <sub>4</sub>	Cara interior de la hoja interior

$T_1$	°C	Temperatura de $M_1$
$T_{k1}$	K	Temperatura de $M_1$
$T_2$	°C	Temperatura de $M_2$
$T_{k2}$	K	Temperatura de $M_2$
$T_3$	°C	Temperatura de $M_3$
$T_{k3}$	K	Temperatura de $M_3$
$T_4$	°C	Temperatura de $M_4$
$T_5$	°C	Temperatura del aire en las proximidades de $M_4$ , en el espacio interior del edificio
$T_e$	°C	Temperatura media del aire exterior
$V_e$	m/s	Velocidad media del viento, medido a 80cm de $M_1$
$T_i$	°C	Temperatura media del aire en el interior de la cámara
$V_i$	m/s	Velocidad media del aire en la cámara
$V_{\text{max junta}}$	m/s	Velocidad máxima del aire en la junta
$V_{\text{max cámara}}$	m/s	Velocidad máxima del aire en la cámara
$e_p$	m	Espesor hoja exterior
$e_{\text{placa}}$	m	Espesor hoja exterior
$b_p$	m	Base de una placa de la hoja exterior
$b_{\text{placa}}$	m	Base de una placa de la hoja exterior
$h_p$	m	Altura de una placa de la hoja exterior
$h_{\text{placa}}$	m	Altura de una placa de la hoja exterior
$e_j$	m	Junta entre placas de la hoja exterior
$e_{\text{junta}}$	m	Junta entre placas de la hoja exterior
$e_c$	m	Espesor de la cámara de aire
$e_{\text{cámara}}$	m	Espesor de la cámara de aire
$I_d$	W/m <sup>2</sup>	Irradiancia solar directa sobre $M_1$
$I_e$	W/m <sup>2</sup>	Irradiancia solar reflejada por el entorno sobre $M_1$
$I_a$	W/m <sup>2</sup>	Irradiancia solar difusa (reflejada por la atmósfera) sobre $M_1$

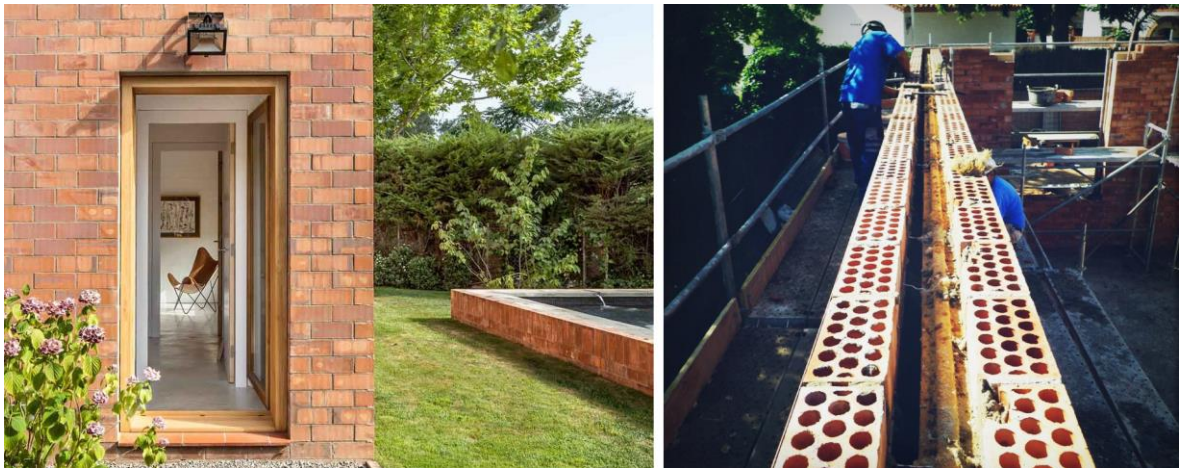
$\alpha_1$		Absortividad a la radiación solar (onda corta) de la superficie $M_1$
$\epsilon_1$		Emisividad (= absortividad) a la radiación infrarroja (onda larga) de la superficie $M_1$
$\epsilon_2$		Emisividad (= absortividad) a la radiación infrarroja (onda larga) de la superficie $M_2$
$\epsilon_3$		Emisividad (= absortividad) a la radiación infrarroja (onda larga) de la superficie $M_3$
$\sigma$	$\text{W/m}^2\text{K}^4$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )
$f_{w \text{ sky}}$	%	Fracción de ángulo sólido del campo visual que ocupa el cielo
$f_{w \text{ suelo}}$	%	Fracción de ángulo sólido del campo visual que ocupa el suelo
$f_{w \text{ ent } 1}$	%	Fracción de ángulo sólido del campo visual que ocupa el elemento 1
$f_{w \text{ ent } 2}$	%	Fracción de ángulo sólido del campo visual que ocupa el elemento 2
$h_1$	$\text{W/m}^2\text{K}$	Coeficiente de convección entre $M_1$ y el aire en contacto
$h_2$	$\text{W/m}^2\text{K}$	Coeficiente de convección entre $M_2$ y el aire en contacto
$h_3$	$\text{W/m}^2\text{K}$	Coeficiente de convección entre $M_3$ y el aire en contacto
$\lambda_p$	$\text{W/mK}$	Conductividad térmica hoja exterior
$C_{ep}$	$\text{J/kgK}$	Calor específico de la hoja exterior
$\alpha_{\text{term-p}}$	$\text{m}^2/\text{s}$	Difusividad térmica de la hoja exterior
$U_{1-2}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	Transmitancia térmica de las capas comprendidas entre $M_1$ y $M_2$ .
$U_{3-5}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	Transmitancia térmica de las capas comprendidas entre $M_3$ y el aire del espacio interior (tiene en cuenta la resistencia superficial de $M_4$ ).
$\mu$	$\text{kg/s m}$	Viscosidad dinámica del aire
$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad cinemática del aire
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Densidad del aire
$C_{e\text{aire}}$	$\text{Wh/kgK}$	Calor específico del aire
$g$	$\text{m/s}^2$	Gravedad (en la Tierra $9,807 \text{ m/s}^2$ )
$\tau$	s	Periodo completo de desfase térmico (en este caso un día, en segundos $24 \cdot 60 \cdot 60 = 86400\text{s}$ )



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Origen y evolución de la fachada ventilada

La llamada fachada ventilada tiene su origen como barrera de protección a la lluvia de los cerramientos verticales. Sus dos ejemplos más representativos son el “cavity wall” anglosajón y el tabique pluvial [1]. Aunque tienen ciertas diferencias entre ellos, ambos tienen en común que son dobles hojas pesadas cerámicas cuya hoja exterior tiene aberturas que comunican el aire de la cámara con el aire exterior.



**Figura 1:** Ejemplo de cavity wall en de Casa 1101 de HARquitectes. Fuente: ph1 Adrià Goula, ph2 HARquitectes

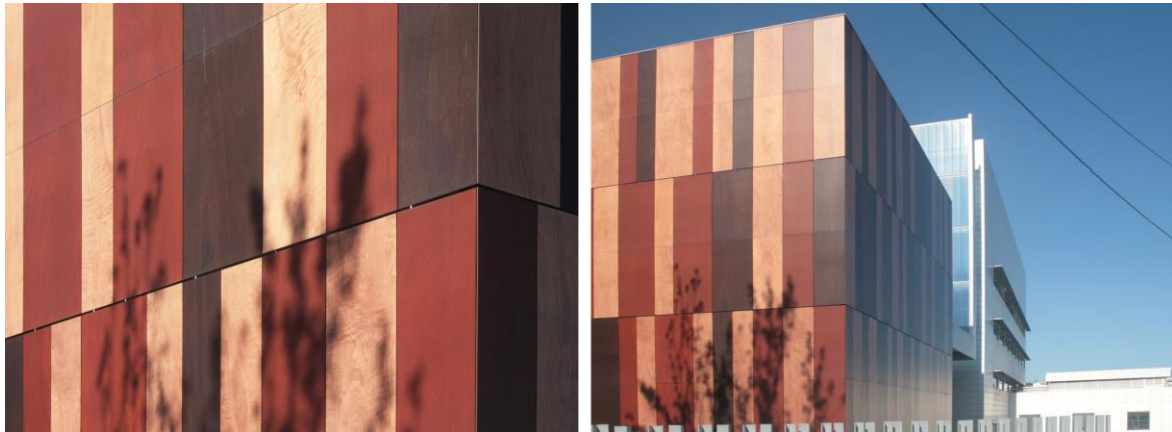


**Figura 2:** Aberturas de ventilación de tabiques pluviales. Fuente: elaboración propia

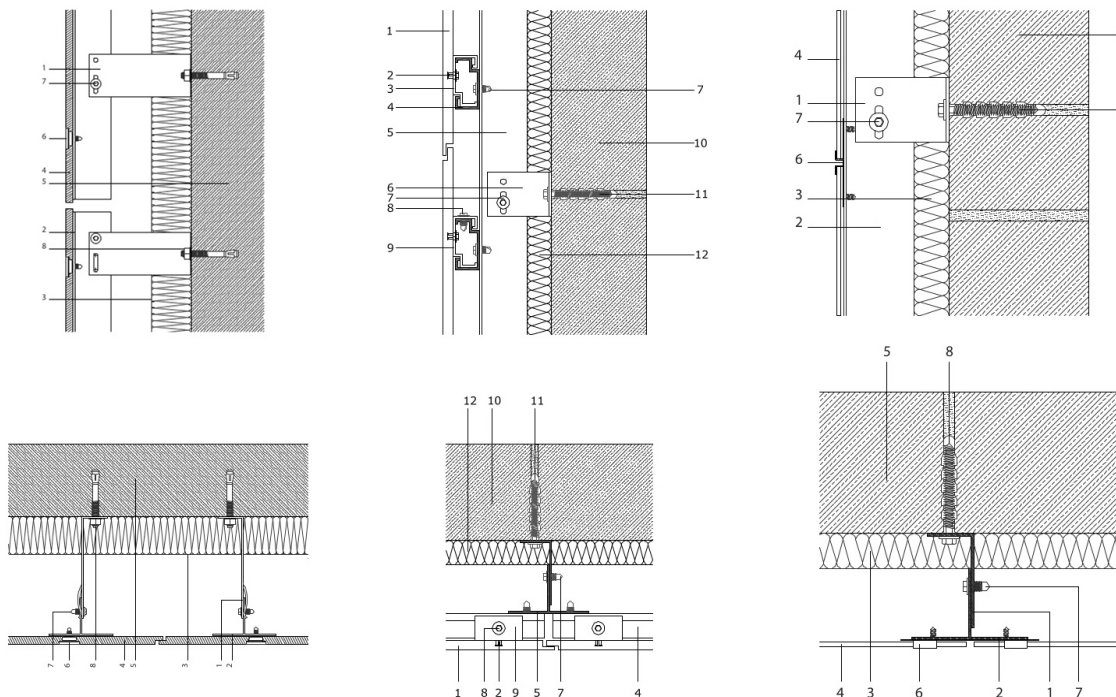
En ambos casos, la cámara de aire funciona como barrera, evitando que el agua que haya podido atravesar por capilaridad la hoja exterior pueda llegar a la hoja interior. La hoja exterior mantiene algunas juntas sin amorterar (o incluso aberturas mayores) en la parte inferior y en la parte superior, con la voluntad que la cámara de aire intermedia pueda ventilar.

Originalmente esta ventilación tenía el fin de renovar el aire húmedo del interior de la cámara por aire exterior, generalmente más seco. Se consigue así disipar el vapor de agua, secando más fácilmente el cerramiento y permitiendo así una mejor protección del interior del edificio.

Más recientemente aparecen otro tipo de fachadas ventiladas, ya sea como evolución de las dobles hojas ventiladas introducidas anteriormente, o aprovechando las características constructivas de los nuevos sistemas de anclaje, que permiten separar los aplacados de la hoja principal. En estos casos, al separar el aplacado (ya sea cerámico, pétreo, de madera, etc.) del soporte, se genera una cámara de aire. Si esta cámara está conectada con el aire exterior se puede considerar como cámara ventilada.



**Figura 3:** Fachada de hoja exterior discontinua en UB Barcelona. Fuente: elaboración propia



**Figura 4:** Detalles de ejemplos de fachadas de hoja exterior discontinua (OJVF). Fuente: Butech, PORCELANOSA Grupo

Aunque la junta entre las piezas de aplacado es necesaria para permitir la dilatación de los materiales, algún estudio [2] apunta que originariamente podría estar sellada con materiales



elásticos. Dice que problemas generados por un mal sellado pudieron hacer evolucionar el sistema hacia la búsqueda de distintas maneras de resolver la entrada de agua sin necesidad del sellado, muchas de ellas permitiendo esta ventilación.

### **1.2. Aplicación y uso de la fachada ventilada**

La fachada ventilada, además de la función de protección a la lluvia, puede tener otras diversas funciones, que se detallan en el capítulo cuatro. Entre ellas creo que es interesante destacar aquí su función estética, pues creo que es una de las que ha influido más en su rápido crecimiento últimamente. El hecho de ser un sistema que independiza el material de la superficie exterior del material de la hoja interior portante de la fachada ha permitido a los arquitectos dar rienda suelta a su imaginación, construyendo edificios con formas complejas o revistiéndolos de materiales muy diversos, buscando en muchos casos imagen de modernidad.



**Figura 5:** Ejemplos de fachadas ventiladas de colores variados. Fuente: Trespa

El hecho de poder ser montada en seco, e incluso prefabricada, ha supuesto también un auge en situaciones donde se prima la velocidad de construcción y/o la posibilidad de montaje y desmontaje.



**Figura 6:** Fachada ventilada prefabricada de madera sobre soporte de CLT, Escuela Waldorf. Fuente: BH arquitectura

Esta renovación del aire de la cámara, además de disipar el vapor, también permite que el aire caliente de la cámara pueda ser substituido por aire exterior, generalmente más fresco, disipando así parte del calor que llega a la fachada por la radiación solar. La mayoría de autores [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] (entre otros) están de acuerdo que el uso de fachadas ventiladas correctamente diseñadas puede suponer un consumo energético de refrigeración en verano mucho menor que usando fachadas no ventiladas o fachadas sin cámara. Algunos dan valores alrededor del 40% [4]

otros hablan de valores del 47% al 51% dependiendo del clima [5]. Además, el hecho de retardar y amortiguar el pico de transferencia energética permite a la maquinaria de climatización poder trabajar a un coeficiente de operatividad mejor [5].

Actualmente, quizás por la crisis energética que estamos viviendo, se empieza a valorar más esta función como elemento protector de la radiación solar por su posible influencia en la reducción de los consumos energéticos. Además, el hecho de que pueda ser usada fácilmente en rehabilitación, manteniendo la fachada existente como base de la hoja interior de la fachada ventilada creo que le da un potencial de uso mucho mayor; ya que para poder conseguir los objetivos marcados de reducción de consumos energéticos y emisiones de gases de efecto invernadero será necesario actuar no solamente sobre la nueva edificación sino también sobre la existente.



**Figura 7:** Ejemplo de rehabilitación energética con fachada ventilada. Fuente: Ulma Architectural Solutions

Cada vez más normativas exigen una reducción de la demanda energética de los edificios, y tanto para poder justificar las exigencias en el proyecto como para poder proponer mejoras en los sistemas existentes es muy importante poder cuantificar los parámetros que intervienen en ello.

En este sentido, considero que la fachada ventilada es un sistema muy desconocido por la mayor parte de los arquitectos, que confían en el sistema sin saber en qué medida va a afectar a las cargas energéticas del edificio o qué pueden hacer para que funcione mejor. El CTE no puede ser de gran ayuda en este caso pues sólo tiene en cuenta el grado de perforación de la hoja exterior a la hora de clasificar las fachadas en dos grados de ventilación. Teniendo en cuenta este grado de ventilación, junto con la conductividad de algunas de sus capas, calcula la transmitancia térmica del cerramiento, pero no tiene en cuenta parámetros como el color de la hoja exterior o su emisividad.

Se plantea la HIPÓTESIS que la metodología de cálculo propuesta por el CTE obvia parámetros que son muy relevantes y afectan al funcionamiento energético de la fachada ventilada.

### **1.3. Objetivos y metodología**

El OBJETIVO de este estudio es desarrollar una herramienta de cálculo, que calcule el flujo energético a través de la fachada ventilada y tenga en cuenta sus parámetros definitorios. Esta herramienta servirá para comprobar si éstos tienen influencia o no en el funcionamiento energético del cerramiento.



Posteriormente esta herramienta se podrá usar para guiar el diseño de dichas fachadas, puesto que el hecho de conocer el grado de influencia de cada uno de los parámetros definitorios del cerramiento puede dar bases sólidas para priorizar la elección de sobre qué parámetros influir para conseguir el efecto térmico deseado.

Soy consciente que para poder aceptar por completo los razonamientos derivados de esta herramienta, previamente se tendría que validar la herramienta de cálculo comparándola con soluciones construidas. Pero las mediciones necesarias para la validación, sumadas a la complicación del análisis realizado para llegar hasta ella habría sido una tarea inabarcable dentro de un Trabajo Final de Máster. Por este motivo se ha decidido dejar la validación de la herramienta y una aplicación más específica para un futuro estudio de Doctorado.

De todas formas, el hecho de realizar este análisis antes de las mediciones de validación es positivo en el sentido que nos permite conocer con qué grado de exactitud habrá que registrar cada uno de los parámetros en el momento de hacer las mediciones de validación; es decir, qué parámetros se tienen que medir con exactitud y cuáles pueden ser aproximados.

La parte analítica del estudio se realiza con la ayuda de diversas fuentes contrastadas, como normativas estatales y municipales, artículos científicos de revistas indexadas, libros de referencia, tesis doctorales y presentaciones de congresos.

Además, han sido de gran ayuda diversas mediciones previas realizadas por Julieta Balter [10], y otras mediciones que hemos estado realizando, paralelamente al desarrollo de este estudio, en la Illa Diagonal. Aunque no voy a desarrollar las mediciones aquí para no abarcar demasiado contenido, han sido un apoyo importante a la hora de programar la herramienta para poder ir comprobando si los resultados podían ser coherentes a la realidad o no.

## 2. ESTADO DEL ARTE - NORMATIVA

El mundo de la construcción está muy reglamentado, por lo que considero que es importante empezar este estudio analizando qué requerimientos y condicionantes tiene la fachada ventilada en diferentes normativas de aplicación.

### 2.1. La fachada y su orientación según el CTE

Antes de entrar en cómo la normativa trata la ventilación de una fachada, voy a dar una visión general sobre qué considera el CTE (Código Técnico de la Edificación) como fachada y su orientación geográfica.

El CTE DB HE [11] define fachada como “*cerramiento en contacto con el aire exterior cuya inclinación es superior a 60º respecto a la horizontal*”. Y define cerramiento como “*elemento constructivo del edificio que lo separa del exterior, ya sea aire, terreno u otros edificios*”.

Además, distingue 8 orientaciones según “*el ángulo  $\alpha$  que es formado por el norte geográfico y la normal exterior de la fachada, medido en sentido horario*”. La norma concreta los ángulos de estas ocho orientaciones en la figura que se muestra a continuación:

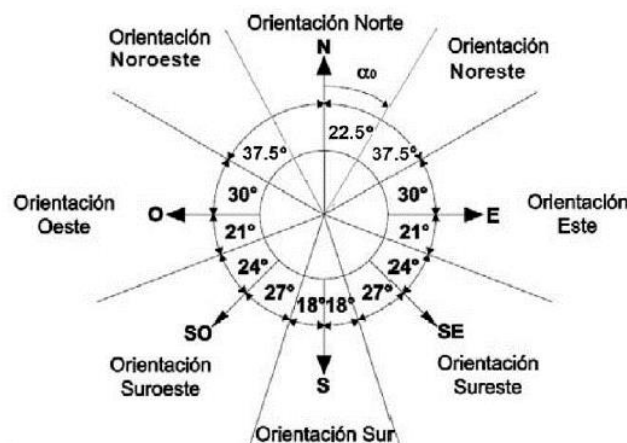


Figura 8: Orientación de las fachadas. Fuente: CTE DB HE












### 2.2. Seguridad frente incendios, según CTE DB SI y Ordenanza Municipal de Barcelona

Aunque el tema central de este estudio es la ventilación y el funcionamiento energético de la fachada ventilada, es indispensable tener en mente la normativa de incendios a la hora de pensar en propuestas y/o modificaciones, sobre todo en los materiales, de soluciones existentes o proyectadas. En este caso me centraré en dos normativas de aplicación en Barcelona, el Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio, del *Código Técnico de la Edificación* [12] y la *Ordenanza Reguladora de les Condicions de Protecció Contra Incendis*, del ayuntamiento de Barcelona [13].

El CTE DB SI, en el apartado 1-3.2, especifica que para el interior de la cámara “*se limita a tres plantas y a 10 m el desarrollo vertical de las cámaras no estancas en las que existan elementos cuya clase de reacción al fuego no sea B-s3d2, B1-s3d2 ó mejor*” y que “*la inclusión de barreras E30 se puede considerar un procedimiento válido para limitar el desarrollo vertical*”. Mientras que para la cara exterior de la fachada dice que “*La clase de reacción al fuego de los materiales que ocupen más del 10% de la superficie del acabado exterior de las fachadas o de las superficies interiores de las cámaras ventiladas que dichas fachadas puedan tener, será B-s3d2 hasta una altura de 3,5 m*”.

como mínimo, en aquellas fachadas cuyo arranque inferior sea accesible al público desde la rasante exterior o desde una cubierta, y en toda la altura de la fachada cuando esta exceda de 18 m, con independencia de donde se encuentre su arranque”, pero admite la excepción siguiente “Como alternativa a la exigencia de una clase de reacción al fuego B-s3d2 para los materiales existentes en las cámaras ventiladas de fachadas de más de 18m de altura, se puede admitir, a partir de los 3,5 m establecidos desde el arranque, una clase C-s3d2 para ellos si se cumple lo que se establece en el artículo SI 1-3.2 (tres plantas y 10 m, como máximo, de desarrollo vertical de la cámara) y lo que se indica en un comentario al mismo, es decir, si las barreras que interrumpen dicho desarrollo vertical son E30. A estos efectos se subraya que dicha interrupción solo precisa ser efectiva en situación de incendio, por lo que nada impide que las barreras sean intumescentes, de tal forma que en situación normal permitan que la cámara se mantenga ventilada”. Hay que remarcar que este cambio de B por C en la cámara no afecta a la cara exterior de la fachada, por lo que en los casos donde el material de la hoja exterior tenga las mismas características en ambas caras, el requerimiento de la cara exterior podrá ser el más restrictivo.

La imagen siguiente es muy útil para comprender de una manera más gráfica los requerimientos de los que hemos estado tratando hasta ahora.

Contribución energética al fuego A-B-C-D-E-F	Opacidad del humo s1, s2, s3	Gotas de fuego d0 - d1 - d2
<b>A1</b> Incombustible	No necesita ensayo	No necesita ensayo
<b>A2</b>  Incombustible	<b>s1</b>  Poca Opacidad	<b>d0</b>  No hay gotas en 10 min.
<b>B</b>  Resiste un ataque prolongado de llamas pequeñas y de un objeto individual ardiendo ambos con limitación de la propagación de llama	<b>s2</b>  Ligera Opacidad	<b>d1</b>  Gotas inflamadas en menos de 10 seg.
<b>C</b>  Resiste un ataque breve de llamas pequeñas y de un objeto individual ardiendo ambos con limitación de la propagación de llama	<b>s3</b>  Opacidad	<b>d2</b>  Ni d0, ni d1
<b>D</b>  Resiste un ataque breve de llamas pequeñas con limitación de la propagación de llama y de un objeto individual ardiendo.		
<b>E</b>  Resiste un ataque breve de llamas pequeñas con limitación de la propagación de llama.	No ensayado	sin indicación o d2
<b>F</b> Sin determinar características o se incumplen los criterios anteriores		

**Figura 9:** Tabla de clasificación de los materiales constructivos según su comportamiento al fuego, según el CTE DB SI.

Fuente: Knauf

En el punto 3.1 del artículo tercero, apartado de materiales, la *Ordenança Municipal de Barcelona* exige que tanto la cara exterior como las de la cámara sean B-s3d0 o más (más exigente en el tema del goteo que el CTE, que pide d2) aunque hace referencia a los criterios del CTE DB SI, por lo que quizás también podría admitir las mismas excepciones que éste.

### 2.3. Ventilación y salubridad, según CTE DB HS

El CTE también habla de las fachadas ventiladas en su apartado dedicado a la salubridad, el CTE DB HS [14]. En su *apéndice A* define la cámara de aire ventilada como “Espacio de separación en la

*sección constructiva de una fachada o de una cubierta que permite la difusión del vapor de agua a través de aberturas al exterior dispuestas de forma que se garantiza la ventilación cruzada”.*

Como podemos comprobar por su definición, este documento se fija principalmente en la capacidad de difusión del vapor de la cámara ventilada mediante el intercambio de aire con el exterior. Por este motivo en el apartado “2.3.2 Condiciones de las soluciones constructivas de fachadas”, la considera una barrera contra la penetración de agua, con un grado de resistencia a la filtración de B3 (muy alta). En caso de que esta cámara no sea ventilada la considera de grado B2 (alta).

Según el mencionado apartado 2.3.2 del CTE DB HS, tanto la solución con cámara ventilada como la no ventilada son buenas opciones para conseguir un buen grado de impermeabilidad de la fachada. Tanto en obra nueva como en rehabilitación añadiendo una hoja exterior a una hoja existente, con una cámara no ventilada se puede conseguir fácilmente un grado 3 o 4 de impermeabilidad, mientras que con una cámara ventilada se consigue el grado máximo, un 5.

Por lo tanto será importante saber dónde se sitúa el límite entre cámara ventilada y no ventilada según el CTE.

Para que dicha cámara pueda ser considerada ventilada, según el CTE DB HS, tiene que cumplir los siguientes requerimientos:

- *“La cámara debe disponerse por el lado exterior del aislante (no hidrófilo)”*
- *“Debe disponerse en la parte inferior de la cámara y cuando ésta quede interrumpida, un sistema de recogida y evacuación del agua filtrada a la misma (véase el apartado 2.3.3.5)”*
- *“El espesor de la cámara debe estar comprendido entre 3 y 10 cm”*
- *“Deben disponerse aberturas de ventilación cuya área efectiva total sea como mínimo igual a 120 cm<sup>2</sup> por cada 10 m<sup>2</sup> de paño de fachada entre forjados repartidas al 50% entre la parte superior y la inferior. Pueden utilizarse como aberturas rejillas, llagas desprovistas de mortero, juntas abiertas en los revestimientos discontinuos que tengan una anchura mayor que 5 mm u otra solución que produzca el mismo efecto”*



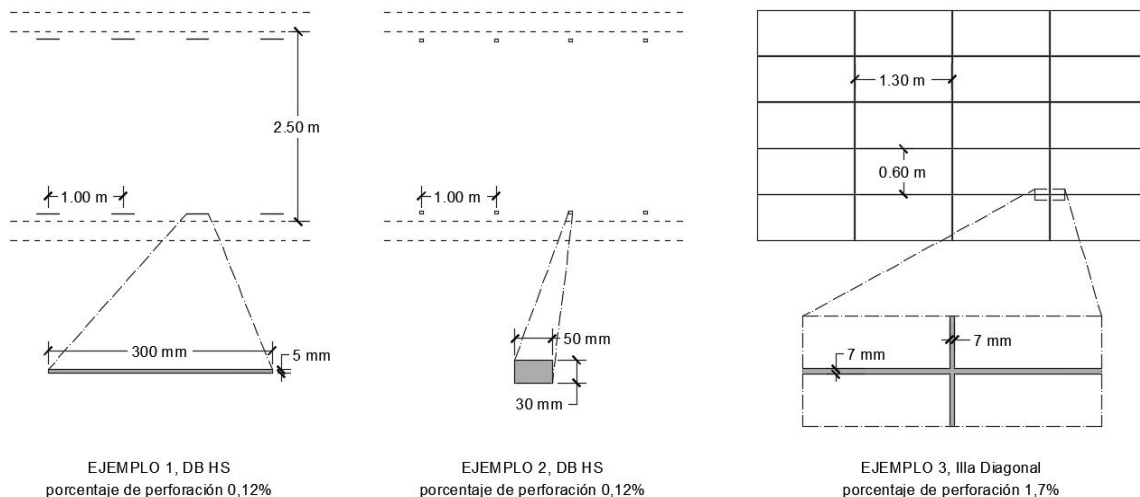
**Figura 10:** Ejemplo de fachada ventilada representada por el CTE (tabique pluvial en Barcelona) y de fachada ventilada de hoja exterior discontinua (Illa Diagonal, Barcelona). Fuente: elaboración propia

Por cómo describe las fachadas ventiladas el CTE DB HS vemos que parece que se refiere principalmente a las dobles hojas pesadas de ladrillo, de forjado a forjado, por lo que las fachadas de hoja exterior discontinua podrían no estar correctamente representadas.

Mientras que el tercer punto puede ser aplicable a una hoja exterior discontinua, el cuarto no tiene sentido en estos casos. Este último punto habla de discontinuidades mayores a 5 mm; en el caso de la Illa Diagonal, por ejemplo, las juntas oscilan entre 6 y 8 mm que aunque son juntas relativamente pequeñas cumplirían el requisito. Pero el otro condicionante que pone el CTE en este punto son las aberturas de ventilación de 120 cm<sup>2</sup> por cada 10 m<sup>2</sup> de paño de fachada, muy por debajo de las juntas mínimas que requiere la hoja exterior discontinua:

- El mínimo requerido por el CTE DB HS de 120 cm<sup>2</sup> por cada 10 m<sup>2</sup> es equivalente a decir 120 cm<sup>2</sup> por cada 100.000 cm<sup>2</sup> lo que supone una perforación media del 0,12%.
- Si consideramos una altura libre entre forjados de 2,5 metros, los 10 m<sup>2</sup> supondrían 4 metros lineales de fachada, por lo tanto 120/4 = 30 cm<sup>2</sup> de abertura por cada metro lineal de fachada, repartidos al 50% arriba y abajo son dos perforaciones de 15 cm<sup>2</sup> por cada metro lineal de fachada, que podría ser una ranura de 30 x 0,5 cm arriba y otra abajo, o una abertura de 3 x 5 cm (también arriba y abajo).
- En cambio, un aplacado como el de la Illa, con piezas de 60 x 130 cm con juntas medias de 7 mm entre placas, supone un porcentaje de perforación del 1,7%, muy lejano del 0,12% anterior. Estas juntas difícilmente podrán ser mucho más pequeñas pues son necesarias tanto por el sistema de montaje como por las dilataciones térmicas de las piezas; por lo que es un sistema que no está bien representado en la norma.

$$1 - \frac{60 * 130}{60,7 * 130,7} = 1 - \frac{7800}{7933,5} = 1 - 0,983 = 0,017 = 1,7\%$$



**Figura 11:** Gráfico de comparación de porcentajes de perforación entre límites del CTE DB HS y ejemplo de hoja exterior discontinua, Illa Diagonal de Barcelona. Fuente: elaboración propia

Por este razonamiento podemos pensar que el CTE DB HS únicamente tiene en cuenta las fachadas ventiladas de hoja exterior cerámica, y que otras tipologías de fachada ventilada deberían ser justificadas como soluciones técnicas alternativas [15].

## 2.4. Ventilación y ahorro de energía, según CTE DB HE / 1

El CTE no habla de fachadas ventiladas en el documento principal de Ahorro de Energía, sino que hace referencia a ellas en el documento de apoyo nº1 *“Cálculo de parámetros característicos de la envolvente”* [16], donde, entre otros muchos parámetros, da las indicaciones pertinentes para poder calcular la transmitancia térmica de los cerramientos.

Este documento considera que la ventilación de la cámara afecta a su transmitancia térmica y divide las cámaras de aire en tres grupos:

- Cámara de aire sin ventilar
- Cámara de aire ligeramente ventilada
- Cámara de aire muy ventilada

La cámara de aire sin ventilar la define como *“aquella en la que no existe ningún sistema específico para el flujo del aire a través de ella. Una cámara de aire que no tenga aislamiento entre ella y el ambiente exterior pero con pequeñas aberturas al exterior puede también considerarse como cámara de aire sin ventilar, si estas aberturas no permiten el flujo de aire a través de la cámara y no exceden 500 mm<sup>2</sup> por m de longitud contado horizontalmente”*.

Define la resistencia térmica de las cámaras de aire sin ventilar en la tabla 2 de dicho documento, presentada a continuación:

e (cm)	Sin ventilar	
	horizontal	vertical
1	0,15	0,15
2	0,16	0,17
5	0,16	0,18

**Figura 12:** Resistencias térmicas de cámaras de aire en m<sup>2</sup>K/W. Fuente: CTE DB HE/1, Tabla 2 del punto 2.1.1

Especifica que estos valores serán aplicables cuando la cámara:

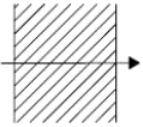
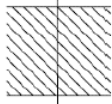
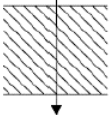
- *Esté limitada por dos superficies paralelas entre sí y perpendiculares a la dirección de flujo de calor y cuyas emisividades sean superiores a 0,8*
- *Tengan un espesor menor a 0,1 veces cada una de las otras dos dimensiones y no mayor a 0,3 m*
- *No tengan intercambio con el ambiente interior*

El punto 1 descarta las cámaras con materiales superficiales metálicos o tratados con bajos emisivos, pero permite la consideración de casi el resto de materiales de construcción. Es importante que la norma especifique los otros dos requerimientos pero es algo que en general ya cumplen todas las cámaras convencionales de fachada, tanto ventiladas como no ventiladas.

A continuación define las cámaras de aire ligeramente ventiladas, con aberturas entre 500 mm<sup>2</sup> y 1500 mm<sup>2</sup> por metro lineal de fachada. En este caso la resistencia térmica de la cámara dice que es la mitad de los valores de la tabla mencionada.

Finalmente define las cámaras de aire muy ventiladas como aquellas cuyas aberturas exceden los 1500mm<sup>2</sup> por metro lineal de fachada. En este caso el documento especifica que *“la resistencia*

*térmica total del cerramiento se obtiene despreciando la resistencia térmica de la cámara de aire y de las de las demás capas entre la cámara de aire y el ambiente exterior, e incluyendo una resistencia superficial exterior correspondiente al aire en calma, igual a la resistencia superficial interior del mismo elemento". Estas resistencias térmicas superficiales se pueden encontrar en la Tabla 1 del mismo documento CTE DB HE/1, y se reproduce a continuación.*

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		$R_{se}$	$R_{si}$
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal $>60^\circ$ y flujo Horizontal		0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal $\leq 60^\circ$ y flujo ascendente (Techo)		0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente (Suelo)		0,04	0,17

**Figura 13:** Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en  $m^2K/W$ . Fuente: CTE DB HE/1, Tabla 1 del punto 2.1.1

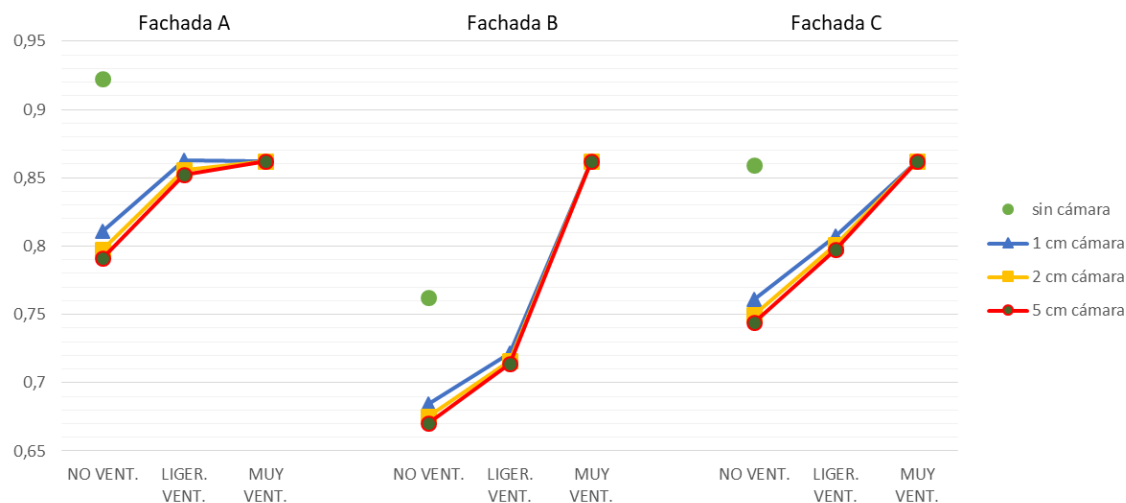
Estos coeficientes superficiales tienen en cuenta tanto el intercambio por radiación como el intercambio por convección con el aire en movimiento. Tal como razona [9, p. 98] para flujo horizontal en el exterior se ha considerado una velocidad del aire alrededor de los 4m/s, mientras que en el interior unos 0,5m/s. (Se trata de una simplificación que no podremos aplicar en este estudio ya que nos interesará tener mucha más precisión en la relación entre velocidad del aire y coeficiente de convección)

Este sistema de cálculo propuesto por el CTE afectará de diferente manera a cada fachada en función de la conductividad térmica de cada una de las capas. Para comprobarlo se analizan tres fachadas con una misma hoja interior (2cm XPS + 14cm ladrillo perforado) y distinta hoja exterior. Cada una de ellas con 10 pequeñas modificaciones distintas: sin cámara, con cámara ligeramente ventilada y con cámara muy ventilada, cada una de tres grosores distintos.

	Hoja exterior	Resist. Hoja exterior ( $mK/W$ )
- Fachada A:	3cm travertino	0,01
- Fachada B:	7cm ladrillo hueco	0,24
- Fachada C:	1,5cm madera	0,09

Podemos ver en la siguiente gráfica como en el caso de la fachada A, con una hoja exterior muy conductora, en todos los casos la U del cerramiento con cámara es mayor que la situación sin cámara. En cambio en la fachada B, con una hoja exterior aislante, la situación muy ventilada tiene una U mayor que en la situación sin cámara. Eso es debido al hecho de que cuanto más aislante es la hoja exterior, más impacto tiene el hecho de no considerarla al tener una cámara muy ventilada; mientras que una hoja exterior muy conductora, puesto que no aporta mucho a la U del conjunto, poco le afecta el hecho de no considerarla al tener una cámara muy ventilada. El límite entre un

caso y el otro se daría en hojas exteriores con una conductividad térmica cerca de la diferencia entre las resistencias superficiales exterior e interior, es el caso de la fachada C.



**Figura 14:** Comparación de la transmitancia térmica U según CTE DB HE en 3 fachadas con hoja exterior distinta, diferentes grosores de cámara y diferentes grados de ventilación. Fuente: elaboración propia

A diferencia del documento de Salubridad CTE DB HS, el de Ahorro de Energía no especifica cómo se tienen que repartir estas aberturas, y sólo habla de una superficie de aberturas por metro lineal de fachada, sin especificar la altura de dicha fachada. Puesto que no tendría sentido considerar que una misma superficie de abertura tiene la misma afectación sobre la transmitancia térmica del cerramiento en una fachada de una planta de altura que en una de seis plantas, por ejemplo, entendemos que aunque no lo especifique, aquí también considera que el forjado divide horizontalmente la fachada. En este documento no especifica si dichas aberturas de 500mm<sup>2</sup> o 1500mm<sup>2</sup> se reparten 50% en la parte superior y en la parte inferior, o pueden ser repartidas homogéneamente.

Si consideramos una altura libre entre forjados de 2,5 metros, los 500 mm<sup>2</sup> por cada metro lineal de fachada, o 2,5 m<sup>2</sup>, supondría una perforación media del 0,02%.

$$\frac{500 \text{ mm}^2}{2,5 \text{ m}^2} = \frac{500 \text{ mm}^2}{2500000 \text{ mm}^2} = 0,0002 = 0,02\%$$

Por el mismo procedimiento 1500 mm<sup>2</sup> por cada metro lineal de fachada, supondría una perforación media del 0,06%. Ambos porcentajes son muy inferiores al mínimo que requiere el sistema constructivo de hoja exterior discontinua, tal como se justifica en el apartado anterior, por lo que puede que no esté correctamente representado en el CTE.



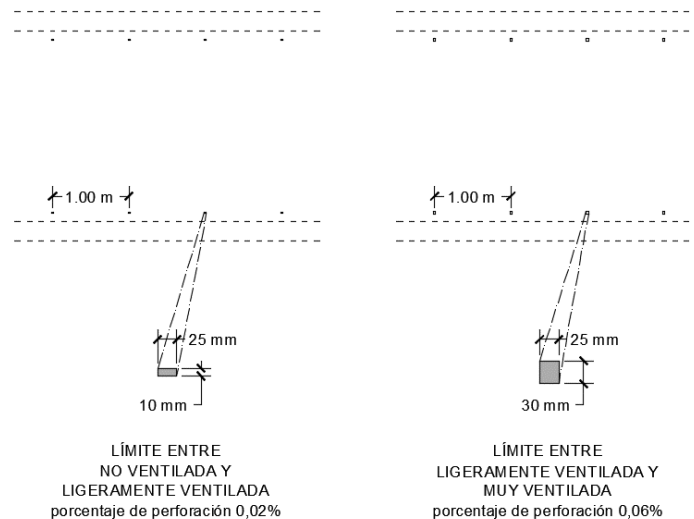


Figura 15: Gráfico de límites entre diferentes grados de ventilación según el CTE DB HE. Fuente: elaboración propia

## 2.5. Justificación como solución técnica alternativa: DITE o ETAG

Tal como razona [15], “*las soluciones constructivas de cerramientos de fachada ventilada no quedan completamente recogidas en los Documentos Básicos (DB) del Código Técnico de la Edificación-CTE. En consecuencia, gran parte de los cerramientos de fachada ventilada deben ser planteados como soluciones alternativas del CTE con lo que debe justificarse su cumplimiento mediante el establecimiento de la equivalencia de las prestaciones respecto a las que se obtendrían de aplicar los DB*”. Se consideran los sistemas como kits que pueden tener su DITE (Documento de Idoneidad Técnica Europeo) obtenidos a partir de las Guías DITE o ETAG [17].

Estas guías ETAG [18] consideran la cámara ventilada cuando cumple los siguientes criterios:

- “*The distance between the cladding elements and the insulation layer or the substrate accordingly (ventilation air space) amounts to at least 20 mm. This air space may be reduced locally to 5 to 10 mm depending on the cladding and the subframe, provided that it is verified that it does not affect the draining and/or ventilation function,*”
- “*Ventilation openings are envisaged, as a minimum, at the building base point and at the roof edge with cross-sections of at least 50 cm<sup>2</sup> per linear metre.*”

El primer punto, ancho mínimo de cámara, el CTE también lo contempla (con valores mayores). Y el segundo supone lo equivalente a una ranura continua de 5mm de grosor en toda la fachada (si los 50cm<sup>2</sup> son arriba y abajo; equivaldría a una ranura de 2,5mm arriba y otra igual abajo si los valores se reparten 50% en la parte superior y 50% en la inferior). En este segundo punto, el porcentaje de perforación también queda muy lejos del requerido para una hoja exterior discontinua.

De todas formas hay una frase que nos hace ver que esta normativa, aunque se llama “*Kits for external wall claddings - part I: ventilated cladding kits comprising cladding components and associated fixings*” también se puede aplicar a situaciones que se consideran no ventiladas:

- “*Between the cladding elements and the insulation layer or the external wall accordingly, there is an air space which shall always be drained and may be ventilated or not.*”

Donde vemos que igualmente en este caso, la norma se fija mucho más en los requerimientos a la protección pluvial, que en los parámetros que afectan al funcionamiento energético:



- *“The claddings will normally contribute to durability of the works by providing enhanced protection from the effect of weathering. They are not intended to ensure airtightness of the building structure.”*
- *“Cladding kits contribute to the watertightness of the wall. The degree of watertightness of a cladding kit is generally assessed by appraisal of design, taking account of the characteristics of the materials used and the geometry of external cladding element and joints.”*
- *“Open joints are not watertight.”*
- *“If joints are not watertight, the insulation layer shall be made of EPS to EN13163, XPS to EN 13164, PUR to EN 13165, phenolic foam to EN 13166 or mineral wool to EN 13162 (WS or WL(P), depending on the national regulations)”*
- *“Water running down the wall shall not reach the inside face of the wall”*
- *“The works including the details (connection, joint, etc ...) shall be designed in order to avoid driving rain penetration beyond the kit or interstitial condensation”*

### **3. ESTADO DEL ARTE – ESTUDIOS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO ENERGÉTICO**

La fachada ventilada y su funcionamiento están cada vez más estudiados, y hay diversos artículos sobre este tema, por lo que antes de hacer mis aportaciones, será imprescindible ver qué se conoce ya de ella.

Es importante remarcar que la gran mayoría de los artículos publicados son estudios parciales que analizan una situación concreta y hacen diversas simplificaciones. Además no suelen definir todos los parámetros que han tenido en cuenta, lo que hace que sea muy difícil poder compararlos y prácticamente imposible extrapolar resultados a otras situaciones. De todas formas son puntos de apoyo esenciales para poder entender el funcionamiento de la fachada ventilada y pueden constituir una buena base de partida.

#### **3.1. Clasificaciones de los estudios**

Hay estudios muy diversos sobre la fachada ventilada, y para tener una visión global sobre ellos los podremos clasificar en función de qué temas tratan y cómo los abordan.

##### **3.1.1. Origen de los datos**

La gran mayoría de estudios se basan en:

- Mediciones de edificios reales o prototipos – [3] [19] [20] [21] [22] – Considero que aunque es el escenario que menos datos de situaciones distintas suele aportar, pues depende de las sondas y de las condiciones meteorológicas, es a la vez el más realista y puede ser muy fiable, pues no depende de algoritmos que pueden no ser válidos.
- Mediciones de laboratorio – [6] [23] – Este es el grupo en el que considero que las simplificaciones suelen hacer menos extrapolables los resultados, pues siempre son situaciones ideales.
- Análisis de cálculos y/o simulaciones – [3] [5] [7] [8] [19] [20] [24] [25] [26] [27] – En este apartado, entran sobre todo las realizadas con programas de CFD (Computational Fluid Dynamics), que permiten conocer a fondo la situación estudiada, pero tal como dicen algunos, requieren grandes tiempos de computación [3] [7] [8]. Además, el hecho de utilizar un programa existente puede hacer que éste tenga en cuenta parámetros que el usuario desconoce que intervienen.

##### **3.1.2. Simplificaciones**

Todos los estudios hacen alguna simplificación de la fachada o de los métodos, para poder abordar el análisis de una manera menos compleja. Las más comunes son las siguientes:

- Situación sin viento – [4] [6] [20] [23] [28] – Ya sea razonando que tiende a no ser estable y no puede ser simulado de una manera sencilla, o diciendo que la situación sin viento es la más desfavorable.
- Sección vertical de fachada (en 2D) – [5] [8] [23] [24] – Ésta es quizás la simplificación más común, basada en el hecho de que el efecto chimenea produce movimientos de aire en vertical y no le afecta la tercera dimensión de la cámara.
- Temperatura homogénea en la hoja exterior – [25] [27] – Se da sobre todo en mediciones de laboratorio, pero también en simulaciones para reducir y simplificar los parámetros de entrada.

### 3.1.3. Aspectos analizados

También se pueden clasificar los estudios en función de qué analizan, ya sea como finalidad o como punto intermedio

- Movimiento del aire en la cámara en detalle: turbulencias y velocidades en cada punto del espacio de la cámara – [6] [8] [20] [23] [25] [26]
- Flujo de aire en la cámara – [3] [5] [7] [20] [21] [22] [25] [26]
- Temperaturas del aire en la cámara – [3] [5] [6] [7] [8] [19] [20] [21] [23] [26]
- Temperaturas superficiales – [3] [5] [6] [7] [19] [20] [21] [23] [26]
- Flujo de energía a través de la hoja interior – [3] [5] [7] [8] [19] [20] [24] – Considero que es el parámetro en que hay que fijarse para poder comparar las distintas soluciones, pues son las ganancias y pérdidas del espacio interior. Aunque el resto de datos son importantes, lo son como punto de referencia y resultados parciales para llegar a éste.

### 3.1.4. Comparaciones

Para poder decir que una solución es mejor o peor es muy importante definir con qué se compara. En este punto hay más disparidad entre los diversos estudios:

- Fachada ventilada  $\leftrightarrow$  Fachada sin cámara o sin hoja exterior – [4]
- Fachada ventilada  $\leftrightarrow$  Fachada no ventilada – [5] [6] [7] [8] [19] [24]
- Ventilada  $\leftrightarrow$  UTC (Unglazed Transpired solar Collector; sistema pasivo de precalentamiento del aire primario de ventilación, que hace pasar la admisión a través de una placa metálica perforada calentada con la radiación solar) – [7]
- Verano con radiación  $\leftrightarrow$  Invierno sin radiación – [7] [20] [21]
- Verano con radiación  $\leftrightarrow$  Invierno con radiación – [7] [19] [20] [21]
- Con viento  $\leftrightarrow$  Sin viento – [5] [24]
- Simulación  $\leftrightarrow$  Medición – [3] [6] [19] [20]
- OJVF  $\leftrightarrow$  CJVF – [3] [20] [21]
- Fachada ventilada  $\leftrightarrow$  Fachada no ventilada con grosor de aislamiento equivalente – [4]

### 3.1.5. Análisis de variación parámetros

Algunos apuntan hacia la misma hipótesis que se plantea y analizan la influencia de algunos parámetros. Algunos de ellos son parámetros constructivos, otros son ambientales y otros son de funcionamiento:

#### Constructivos

- Altura de la fachada – [6] [25]
- Aperturas de ventilación – [3] [19] [21] [22]
- Color de la hoja exterior – [21]
- Espesor de cámara – [2] [4] [21] [25]
- Distribución del aislamiento – [4]
- Rugosidad de las superficies – [4]
- Absorción / Reflexión de  $M_1$  – [4] [21]
- Resistencia térmica de la hoja exterior – [4]

#### Ambientales

- Radiación solar – [4] [6] [8] [20] [21] [24]
- Viento – [2] [3] [5] [7] [24]

- Temperatura del aire exterior – [20] [21] [24]

#### De funcionamiento

- Diferencia de temperatura aire interior-exterior – [25]

### **3.2. Detalles de algunos estudios**

Por el hecho de ser estudios parciales, cada uno de los artículos nos permite entender una parte del funcionamiento de la fachada, o un tipo de fachada, un aspecto a tener en cuenta, etc. Muchas de las informaciones de dichos artículos están citadas a lo largo del documento, pero hay otras difíciles de ligar al discurso pero que creo que es imprescindible referir en este documento, aunque sea en forma de lista, pues han sido importantes para el desarrollo del estudio.

De manera genérica, diversos artículos afirman que el uso de fachadas y cubiertas ventiladas puede ayudar a reducir las cargas de refrigeración en verano, por lo tanto los consumos energéticos debidos a esta sistemas de climatización. Pero algunos entran en más detalle:

- “[...] greater radiation increases the temperature inside the air cavity which in turn brings about an increase in heat flux.” [19]
- “The energy saving increases remarkably as solar radiation intensity increases; the bigger the solar radiation is, the more efficient ventilated facades turn out to be from an energy saving point of view.” [4]
- “The authors concluded that temperatures in OJVF under radiation conditions are lower than temperatures in the conventional façades with sealed cavity, which means less heat is transferred to the room” [6]
- “The air average temperature in the cavity is between exterior air temperature and the temperature of the solid surfaces [...] on both sides of the chamber. In this façade, the cavity air temperature is lower than the temperature reached in a conventional façade with a sealed air chamber.” [8]
- “This (air) flow removes part of the heat loads, reducing the heat transfer to the indoor environment. This phenomenon can also be observed in other typologies of ventilated façades, with the openings located only at the bottom and top of the façade, although their efficiency is not as high in comparison to OJVF, due to the reduced flow entrance and the higher temperatures attained at the upper section of the air gap” [6] (En este apartado, dicho artículo cita a otros autores)
- “El uso de fachadas ventiladas, cuando su diseño es correcto, puede reducir considerablemente dicho consume en verano, especialmente en situaciones de fuerte irradiación solar” [24]
- “la convección natural provoca un flujo de aire a través del canal formado por ambas superficies, que extrae el calor acumulado en las mismas, lo que en principio debería traducirse en una reducción de las temperaturas de dichas paredes y por tanto de la ganancia de calor hacia el interior del edificio” [24]

El hecho de no considerar el viento es una de las simplificaciones más usuales, ya sea alegando su naturaleza impredecible o su dificultad de modelización.

- “The comparison between the numerical and the experimental data [...] showed that the role played by the wind velocity on the air cavity velocity was generally the most difficult to predict” [3]

Algunos de ellos razonan que al no considerarlo están estudiando la situación más desfavorable:

- (Comparando UTC y OJVF) “[...] *the worst conditions for an OJVF take place in calm weather*” [7] (En este apartado, dicho artículo cita a otros autores).

Considero que esta afirmación también podría aplicarse a las NVF y las CJVF, pues el viento ayuda a refrigerarlas a todas, con lo que reduce su flujo de ganancias hacia el interior del edificio.

- “[...] *the heat fluxes incoming through the UVF façade are always higher than that one calculated for the OVF with homologues wind scenario*” [5] (en este estudio utiliza nomenclatura distinta: UVF (Unventilated Façade) equivalente al NVF usado aquí, y OVF (Opaque Ventilated Façade) equivalente al VF usado aquí).
- “*En cuanto a la influencia de la velocidad del aire exterior, cabe reseñar como el flujo de calor disminuye a medida que se incrementa la velocidad del viento. Esto puede venir motivado por el aumento de la ventilación en el interior de la cámara de ventilación y también por el aumento de intercambio energético en la cara externa de la fachada para mayores valores de la velocidad del viento.*” [24]

Y siguiendo con el viento, algunos comparan el efecto del viento y el del efecto chimenea a la hora de generar el flujo de aire en la cámara:

- “*The results show that the wind forces in conjunction with the buoyancy forces affect significantly the performance of VF components*” [5]
- “*The airflow inside the cavity depends substantially by the value of the wind velocity [...] the buoyancy effects are almost negligible for this scenario*” [5]
- “[...] *pressures created by strong winds are much higher than those caused by stack effect or mechanical systems.*” [2]
- “*The maximum values of both air temperature (in calm wind conditions) and velocity are reached [...] in phase with the highest incident solar radiation.*” [5]
- “*After sunset, the radiative heat flux between the façade and the sky cools the counter-wall of the VF, which reaches temperatures lower than the outdoor air temperatures and, consequently, the airflow within the cavity cools and goes from the top to downwards*” [5]
- “[...] *(in calm wind conditions) the profiles of velocity (of the airflow within the cavity) are intimately related at the profiles of temperature since the air stream is generated only by the buoyancy effect.*” [5]
- “[...] *discontinuities and instabilities in the flow inside the ventilated cavity, which is highly dependent not only in the façade geometry by also on the solar incident radiation, outdoor temperature and wind conditions. All these factors, summed to the general lack of data related to these construction systems and the absence of validated models, evidence that there is still a lot of work to do before having a global criterion to determine the energy behaviour of OJVF*” [6]

Aunque en algunos casos las situaciones descritas sean demasiado parciales y las conclusiones no puedan ser extrapolables a otras, pueden ayudar a entender aspectos concretos del funcionamiento:

- *“In a general way, it can be stated that the OJVF is better for summer conditions, mainly at the sunny side of the building while the conventional sealed cavity façade is better for winter conditions” “when there is no solar radiation, an OJVF could offer a lower insulation than a sealed cavity façade” “the OJVF could be a better system than the sealed façade, mainly in southern façades of buildings, in climates with hot summers and mild winters” [7]*
- *“Solar radiation increases the surface temperatures of the cladding kits when exposed. The increase depends on the radiation flow and the energy absorption of the surface (colour). It is generally considered that the maximum surface temperature is + 80°C (e.g. for opaque cladding elements)” [18]*
- *“When the external temperature is lower than the internal temperature the gradient inside the wall is reduced with the solar gains. For this reason, during the winter season a high cavity air flow rate is not desirable, because the convective heat transfer between the air and the internal layer reduces the temperature on the inside wall of the cavity and increases heat flux through the inside wall” [19]*
- *“During the winter season high values of the cavity air flow are not desirable, because the convective heat transfer between the air and the inside wall reduces the temperature on the inside wall of the cavity and increases the heat flux through the inside wall” [3]*

### **3.3. Puntos en común entre los estudios**

De todas las informaciones que podemos encontrar en los estudios consultados, en lo que la gran mayoría de estudios sí están de acuerdo es en lo siguiente:

- La fachada ventilada es un tipo de cerramiento que en verano puede implicar menos ganancias que las fachadas no ventiladas o las fachadas sin cámara.
- Las causas de la ventilación del aire en la cámara se deben a:
  - Diferencia de temperatura del aire interior-exterior
  - Presión de viento sobre la fachada. Tal como apunta [6], en las juntas de una OJVF se producen vórtices de recirculación, por lo que planteo que este último punto se pueda dividir en:
    - Turbulencia y renovación de aire en las juntas
    - Flujo de aire inducido por diferencias de presión del viento en diferentes zonas de la fachada

Puesto que la herramienta está pensada para comparar diversos cerramientos sin tener en cuenta la forma del edificio, no se tendrá en cuenta el flujo de aire inducido por diferencias de presión del viento en diferentes zonas de la fachada. Aun así, en la programación se han hecho previsiones por si se quiere implementar en futuras versiones de la herramienta.

Tampoco se han considerado las turbulencias en la zona inferior y superior de la fachada, así como tampoco un reparto no homogéneo del viento en el exterior. De todas formas, aquí también se ha preparado la herramienta para que pueda admitirlo en el futuro.

### **3.4. Flujos de aire inducidos en la cámara y fachadas PER (Pressure Equalized Rainscreen)**

Algunos estudios apuntan que el viento podría generar más diferencia de presión que el efecto chimenea [2] [29]. Pero tal como razonan la mayoría de los estudios que no tienen en cuenta el viento, la situación más desfavorable en verano para una fachada ventilada es cuando no hay viento, pues más viento implica más disipación de calor y menos flujo de calor hacia el interior. De esta



manera, al no considerar el flujo inducido a causa del viento estaría estudiando una situación más desfavorable.

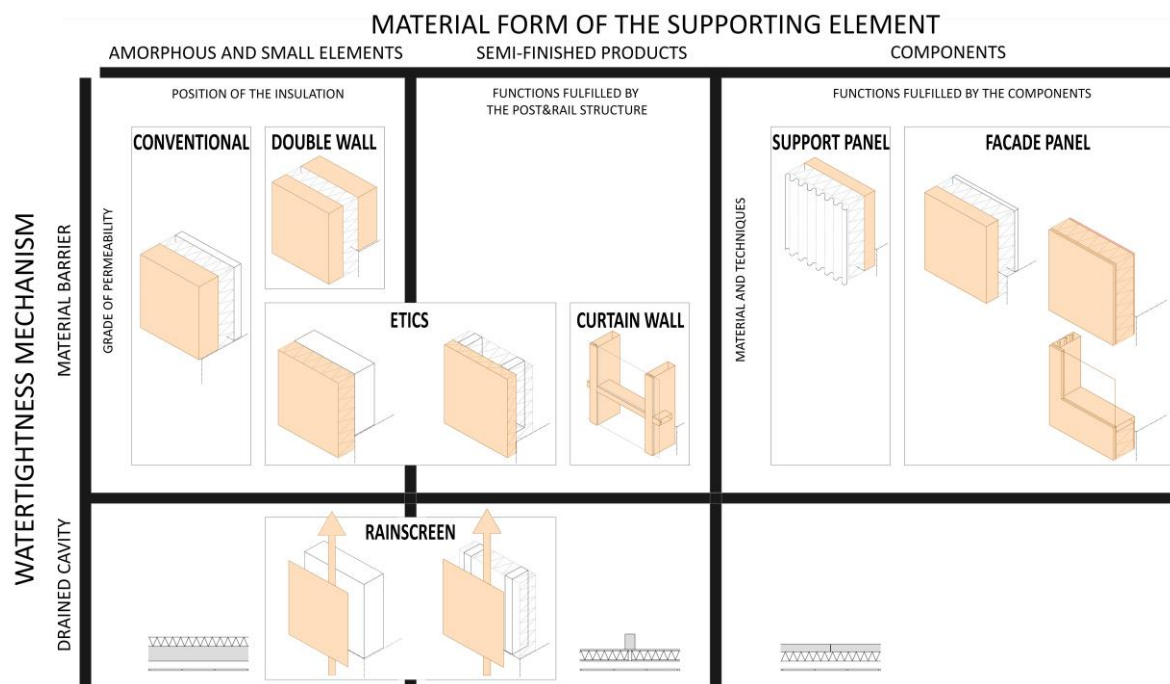
Por otro lado, otros autores recomiendan dividir la cámara por tramos como mecanismo de ecualización de presión [3], lo que evita que estas diferencias de presión generen grandes flujos de aire en la cámara. Se basan en el razonamiento que esta entrada mucho mayor de aire exterior puede suponer una entrada de agua de lluvia [22] que puede poner en entredicho la capacidad de protección pluvial de la fachada ventilada. Como podemos ver en este artículo [2], muchos de los consejos para una buena PER son contrarios a los que otros estudios dan para una buena ventilación de la cámara y la evacuación del calor.



## 4. CONCEPTOS Y TERMINOLOGÍA

### 4.1. Tipologías de fachada

Como ya se ha visto en el capítulo introductorio, el origen de la fachada ventilada es sobre todo por temas de estanqueidad frente al agua de lluvia. Por este motivo será interesante hacer referencia a la taxonomía de fachadas que podemos encontrar en la plataforma virtual *facad3s.net*, que se reproduce a continuación [30]:



**Figura 16:** Taxonomía de fachadas en función de la forma del material de la hoja de soporte y el mecanismo de estanqueidad al agua de lluvia. Fuente: *facad3s.net*

Esta tabla clasifica todos los tipos de fachadas en función del mecanismo de estanqueidad al agua (filas) y la forma del material del elemento de soporte (columnas). Será interesante ver como se distribuyen en este cuadro las cámaras de aire, tanto ventiladas como no ventiladas.

La fila superior está destinada a las fachadas que consiguen la estanqueidad por barrera material, ya sea un gran grosor de material poroso (como por ejemplo el ladrillo en la fachada convencional) o un pequeño grosor de un material impermeable (como por ejemplo el revestimiento de un SATE). En esta fila es donde, entre otras soluciones, encontramos las fachadas con cámara no ventilada, situadas en lo que llama “double wall” ya sea con o sin aislamiento en su interior.

La fila inferior está destinada a las soluciones con cámara drenada, destinada a las fachadas ventiladas, en inglés llamadas “rainscreen”.

En este caso, las denominaciones “cámara drenada” en lugar de “cámara ventilada”; y “rainscreen” (traducido literalmente como “barrera pluvial”) en lugar de “fachada ventilada” considero que son más precisas en cuanto se refieren únicamente a su función de estanqueidad a la lluvia, y no implican necesariamente ninguna afectación en el funcionamiento energético de la fachada. Con este razonamiento, será necesario escoger correctamente los términos y definir a qué refieren cada uno de ellos, para saber a qué nos referimos cuando hablamos de “fachada ventilada”.

#### **4.2. Clasificación tipológica de las fachadas ventiladas según su función**

Aunque los orígenes de la fachada ventilada sean como mecanismo de protección frente la lluvia, no hay que olvidar que puede tener tres funciones (no excluyentes entre ellas), pero que no necesariamente todas las fachadas ventiladas las cumplen todas [1]:

- protección de la lluvia
- protección de la radiación solar
- estética o revestimiento

Con lo cual, tal como se defiende en el artículo citado [1], se propone no englobar dentro de término de fachada ventilada soluciones que tienen objetivos diversos.

Se mantendrán los nombres de cámara ventilada y fachada ventilada como denominación genérica por el hecho de ser una cámara de aire que se comunica con el aire exterior. Pero si nos fijamos en estas tres funciones, cada una de ellas podrá dar lugar a una denominación distinta, como se desarrolla a continuación.

##### **4.2.1. Protección de la lluvia**

Tal como ya se ha hablado en otros apartados, la función originaria de la fachada ventilada es la protección de la lluvia, evitando que ésta pueda llegar a la hoja interior. Así, se diferencian las dos funciones de barrera: la barrera al agua, formada por la hoja exterior, y la barrera al aire, la hoja interior [2] [31]. Para que la hoja exterior pueda cumplir su función de barrera pluvial será muy importante:

- Resolver correctamente las aberturas de la hoja exterior de manera que dificulten la llegada de agua al interior.
- Evitar que el agua que haya podido llegar a la cara interior de la hoja exterior, ya sea a través de las juntas o por capilaridad, pueda llegar a la hoja interior a través de los conectores que fijan la hoja exterior a la hoja interior.
- Proteger los encuentros de la hoja interior con el suelo o con las ventanas para evitar que el agua que haya podido llegar a la hoja interior sea llevada hacia el exterior y evitar que se quede en esos puntos débiles.

Todas estas protecciones se ven reforzadas por la capacidad del aire de la cámara de evaporar el agua que haya podido entrar. Este potencial podrá ser mayor que en una fachada con cámara no ventilada por la posibilidad de renovar este aire con un aire exterior más seco. La ventilación por ambas caras de la hoja exterior será especialmente necesaria cuando la hoja exterior sea porosa, como es el caso de las hojas exteriores de madera.

Teniendo en cuenta todos los requerimientos que requiere el sistema para poder garantizar su función de protección de la lluvia, se podrían clasificar las fachadas ventiladas entre las que los cumplen y las que no. El nombre más preciso para las fachadas que cumplen dichos requerimientos debería ser fachada con cámara drenada.

##### **4.2.2. Protección de la radiación solar**

Si en el subapartado anterior la función de la hoja exterior era de paraguas, en este caso la podemos considerar de sombrilla [1], entendiendo la hoja exterior como un elemento de sombra de la hoja interior. La renovación del aire de la cámara supone una disipación del calor de las superficies de la cámara, de esta manera, en situación de fachada soleada, la fachada ventilada alcanzará

temperaturas inferiores que una fachada con cámara no ventilada, lo que supondrá un menor flujo de calor hacia el interior [6].

Cuanto mayor sea la ventilación y la renovación del aire de la cámara, mayor será la capacidad de disipar calor del interior de la cámara. Tal como apuntan algunos artículos, esta entrada de aire también puede suponer una entrada de agua de lluvia [2] [22], pero a diferencia de las fachadas con función de cámara drenada, en este caso no será imprescindible que la hoja exterior resuelva la protección a la lluvia, pues esta función puede estar encomendada a la hoja interior.

Algunas de las fachadas ventiladas que no garantizan la protección a la lluvia son aquellas en las que las juntas son muy anchas y permiten la entrada de la lluvia ya sea directamente o por salpicadura.



**Figura 17:** Revestimiento de lamas de madera con juntas muy abiertas, en Centre Cívic Pere Quart, Barcelona. Fuente: elaboración propia

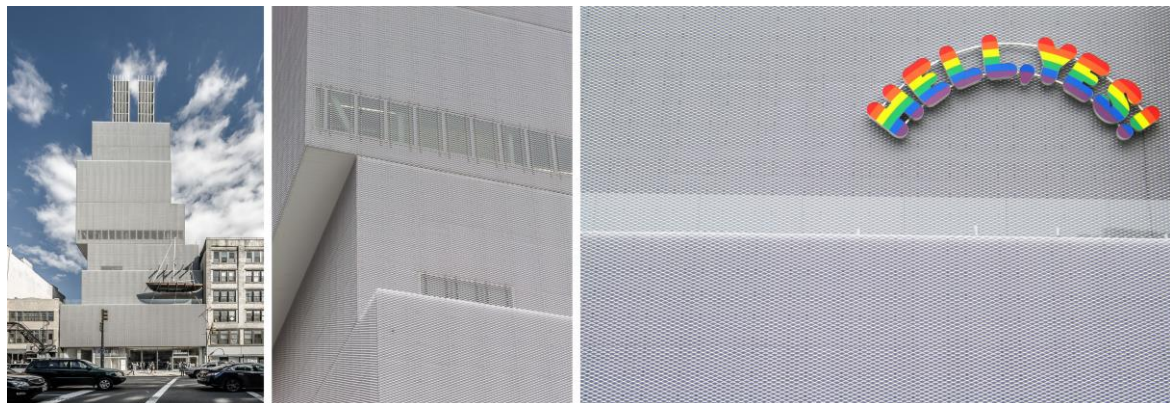
Aunque en el artículo [1] se denomina *fachada ventilada* a la que busca cumplir esta función de proteger la hoja interior de la radiación solar directa, considero que es más adecuado darle un nombre más preciso y dejar *fachada ventilada* como nombre genérico. Este nombre podría ser fachada parasol.

Un ejemplo quizás todavía más extremo de fachada parasol sin función de cámara drenada podrían ser los jardines verticales en fachada. Aunque se trata de soluciones que se saldrían de la clasificación de cámara ventilada, pues no se puede considerar que la vegetación delimite un volumen que se pueda considerar “*cámara de aire*”. Aun así creo que es interesante mencionarlas pues ejemplifican claramente la función de proteger de la radiación pero no de la lluvia.



**Figura 18:** Ejemplos de fachadas vegetales: Caixaforum de Madrid, de Herzog & de Meuron con Patrick Blanc, y vivienda particular en Barcelona. Fuente: ph1 Óscar Carnicero Sánchez, ph2 elaboración propia

En cambio las fachadas resueltas con un deployé o una chapa perforada por el exterior es posible que sí pudieran ser consideradas como “*cámaras ventiladas con función de fachada parasol*” pues aunque el límite entre el aire de la cámara y el aire exterior está muy perforado, sí se puede trazar claramente esta división.



**Figura 19:** New Museum of Contemporary Art, de Sanaa, en Nueva York como ejemplo de fachada de hoja exterior de deployé. Fuente: Maciek Lulko, Peter Guthrie y John Zacherle

#### 4.2.3. Compositiva

En todos los casos, la hoja exterior es la parte visible de la fachada ventilada, por lo que la función estética o de revestimiento siempre será un aspecto a tener en cuenta. En los casos donde no se cumplen los requerimientos de cámara drenada o no se ha diseñado la fachada para tener una buena disipación de calor, sino que la razón principal es compositiva, la podremos llamar fachada revestida.

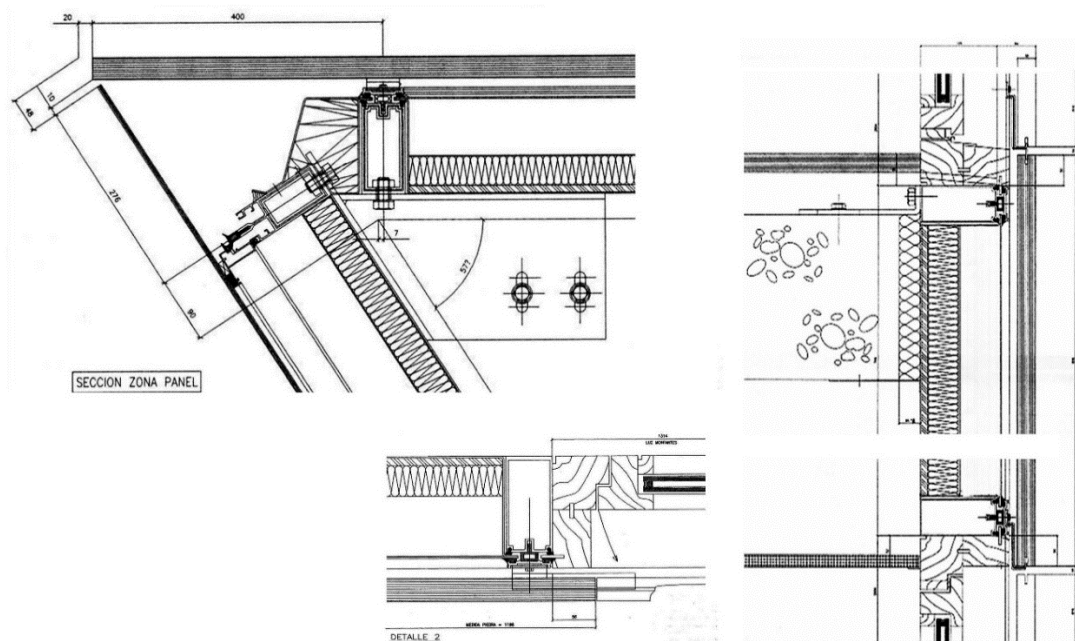
Un ejemplo donde se usa una solución de fachada ventilada como fachada revestida es en las antiguas oficinas de Carbueros Metálicos. En este caso la hoja interior se construye con un sistema de muro cortina Stick, que resuelve la estanqueidad al agua. Se puede comprobar en la sección vertical detalle como la parte inferior de la ventana no busca expulsar el agua hacia el exterior sino que esconde la carpintería detrás del aplacado de piedra.





**Figura 20:** Fotografías de las antiguas oficinas de Carburos Metálicos. Fuente: B01 arquitectes (fotografía general), Cristina Pardal (fotografía detalle)

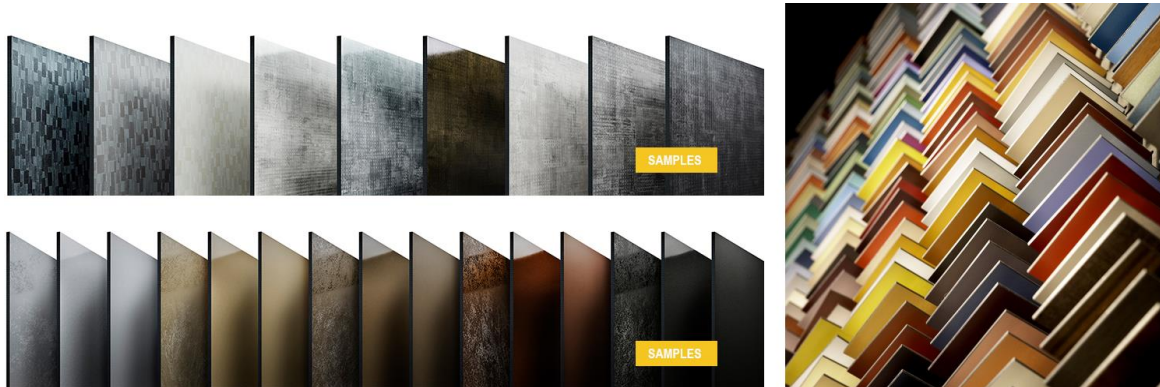
Tampoco busca cumplir la función de protección a la radiación, pues con una cámara tan estrecha (alrededor de 25mm en la parte más ancha, con estrechamientos de unos 12mm) no puede considerarse que el aire de dicha cámara se renueve suficiente para poder disipar adecuadamente el calor de la cámara. De hecho, no llega al espesor mínimo que requiere el CTE para poder considerarla una cámara de aire ventilada, aunque quizás sí cumpliría las ETAG.



**Figura 21:** Detalles de la fachada de las antiguas oficinas de Carburos Metálicos. Fuente: B01 arquitectes

En otros casos se podrá escoger el sistema por sus ventajas sobre el revestimiento adherido por el hecho de que las fijaciones separan el aplacado de la hoja exterior y facilitan la continuidad de la envolvente térmica entre una capa y la otra sin ningún requerimiento estructural del aislante para poder soportar el aplacado.

Tanto si la función de revestimiento es la única que se espera de ella, como si se quiere sacar el máximo provecho de su función de cámara drenada y fachada parasol, cada vez hay materiales y acabados más diversos que nos permiten resolver el revestimiento flotante con total libertad, lo que considero que le hace augurar un gran futuro como sistema constructivo.



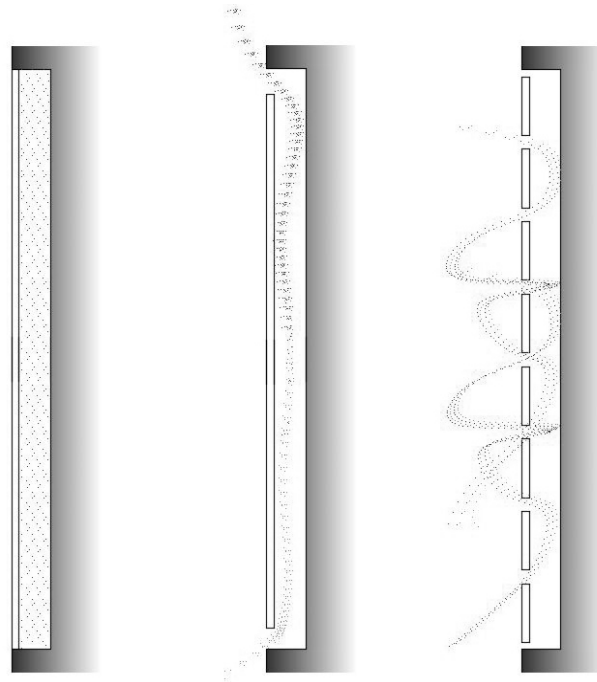
**Figura 22:** Muestras de los acabados de paneles exteriores de fachada ventilada. Fuente: Trespa



**Figura 23:** Revestimiento perforado con motivos florales en el centro de tecnología y cultura de Tonghua con el sistema Trespa Meteon. Fuente: Trespa

#### **4.3. Clasificación tipológica de las fachadas ventiladas según el reparto de las aberturas en la hoja exterior**

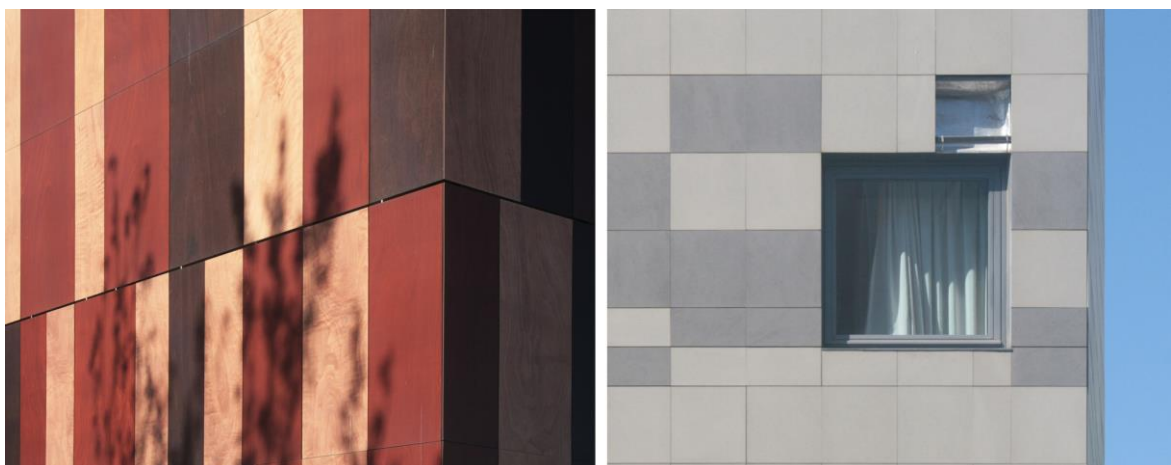
Además de poder clasificar las fachadas ventiladas por su función, también se pueden agrupar por la manera como estén repartidas las aberturas que comunican el aire del interior de la cámara con el aire exterior. Las podremos clasificar en 2 grandes grupos: fachadas ventiladas de junta abierta (OJVF) y fachadas ventiladas de junta cerrada (CJVF).



**Figura 24:** Clasificación de las fachadas en función del reparto de las perforaciones en la hoja exterior: NVF, CJVF y OJVF respectivamente. Fuente: Cristina Pardal

#### 4.3.1. Fachadas ventiladas de junta abierta - OJVF

Las fachadas ventiladas de junta abierta son aquellas en las que la entrada de aire se realiza por aberturas repartidas más o menos homogéneamente por toda la superficie de la fachada. En general estas aberturas son las juntas entre las placas que componen la hoja exterior, de ahí su nombre de “junta abierta”. En la mayoría de artículos las encontraremos como OJVF (Open Joint Ventilated Facade). Estas juntas tienen su justificación, no sólo por dicha ventilación sino también como juntas de montaje y/o juntas de dilatación entre las distintas piezas de la hoja exterior.



**Figura 25:** Ejemplos de OJVF en Barcelona. Fuente: elaboración propia



#### 4.3.2. Fachadas ventiladas de junta cerrada - CJVF

Las fachadas ventiladas de junta cerrada son aquellas en las que la entrada y la salida de aire se realizan por aberturas situadas en la parte inferior y en la parte superior de la fachada. Puede ser debido a hojas exteriores continuas o a aplacados de junta cerrada. En la mayoría de artículos las encontraremos como CJVF (Closed Joint Ventilated Facade).

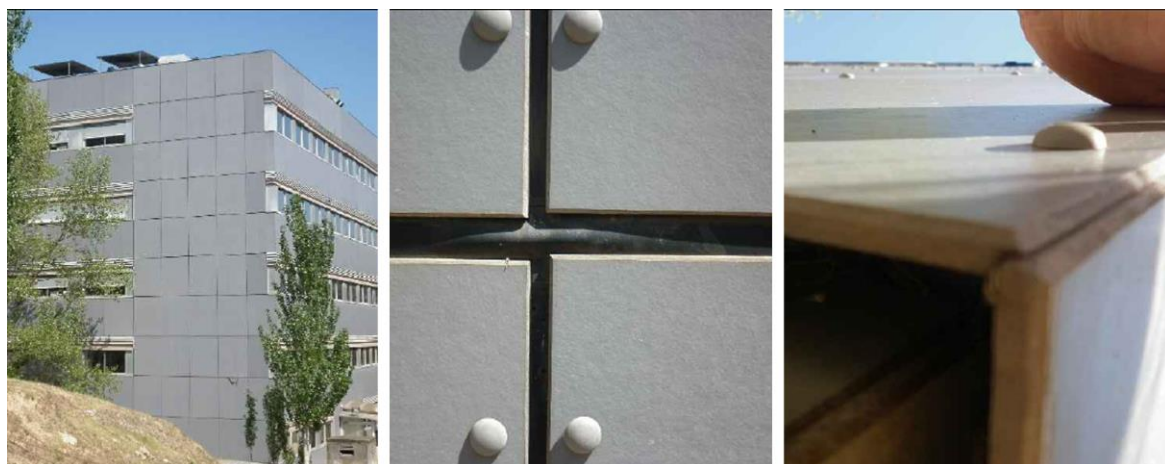


Figura 26: Ejemplo de CJVF, Facultad de Ciencias de la UAB. Fuente: Julieta Balter

Los aplacados de junta cerrada pueden ser por sellados con perfiles conformados de EPDM o siliconas, o por sistemas de fijación o engatillado que dificultan la entrada de aire a través de las juntas. En [18] podemos encontrar una clasificación de kits de fachada ventilada, con sus diferentes tipos de fijaciones y aplacados.

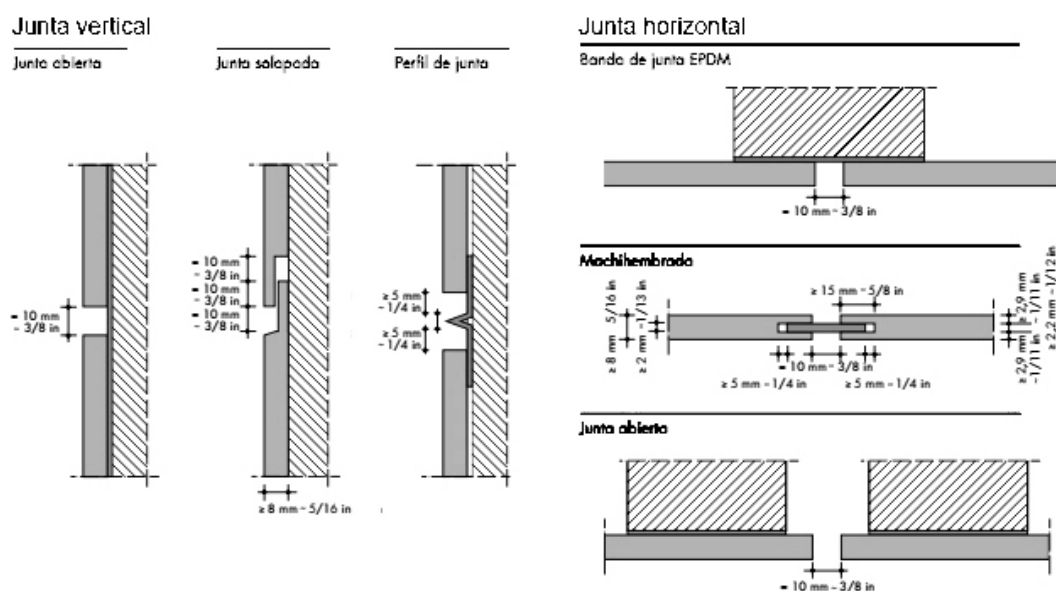


Figura 27: Ejemplos de distintos tipos de junta. Fuente: Trespa

#### 4.3.3. Tipologías intermedias

Esta clasificación OJVF y CJVF no abarca absolutamente todas las fachadas ventiladas, sino que podemos encontrar muchos puntos intermedios o mixtos. El más común es quizás una OJVF cuya



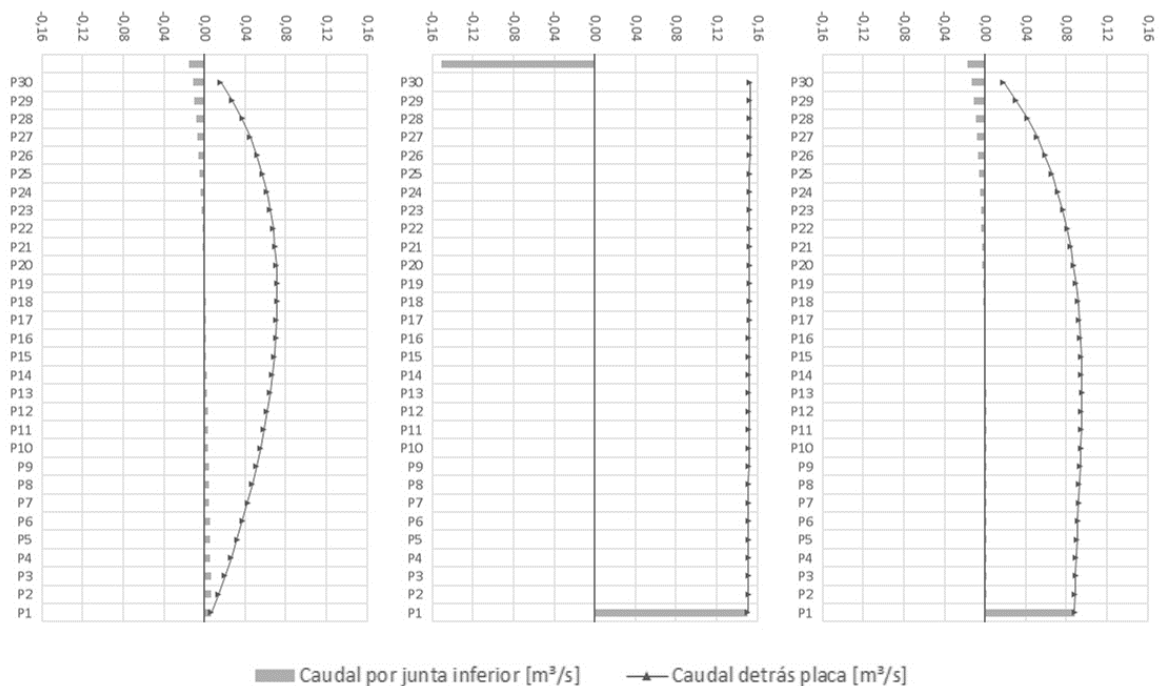
cámara se encuentra abierta completamente por la parte inferior, lo que supone una abertura inferior mucho mayor que las juntas repartidas por su superficie.



**Figura 28:** Ejemplo de morfología intermedia OJVF-CJVF, Edificio Omega UPC. Fuente: elaboración propia

#### 4.3.4. Circulación del aire en función del reparto de las aberturas

Esta diferente distribución de las aberturas puede hacer que la renovación de aire sea muy distinta en ambas soluciones. Mientras que en las CJVF el caudal de aire es constante en toda la altura de la fachada, en las OJVF los caudales de aire son muy diferentes en toda la cámara puesto que las entradas y salidas están más repartidas. Diversos estudios [6] [20] apuntan que en una OJVF soleada, la entrada de aire se produce por las juntas de la mitad inferior y la salida por las juntas de la mitad superior, dándose así el caudal máximo en la cámara en la zona central.



**Figura 29:** Caudales en juntas y en cámara en: OJVF, CJVF y tipología intermedia respectivamente. Fuente: elaboración propia



A modo de ejemplo, con la hoja de cálculo que se desarrolla en el capítulo 6, se han calculado los caudales en diversos puntos de una franja vertical de tres fachadas distintas sometidas a radiación solar y sin viento exterior, para mostrar así de manera cualitativa como se reparten los caudales en cada una de ellas. Los valores positivos de caudal suponen ascensión por la cámara y entrada a través de la junta, y los valores negativos son descensión por la cámara y salida a través de la junta. La placa P1 es la inferior y la P30 es la superior.

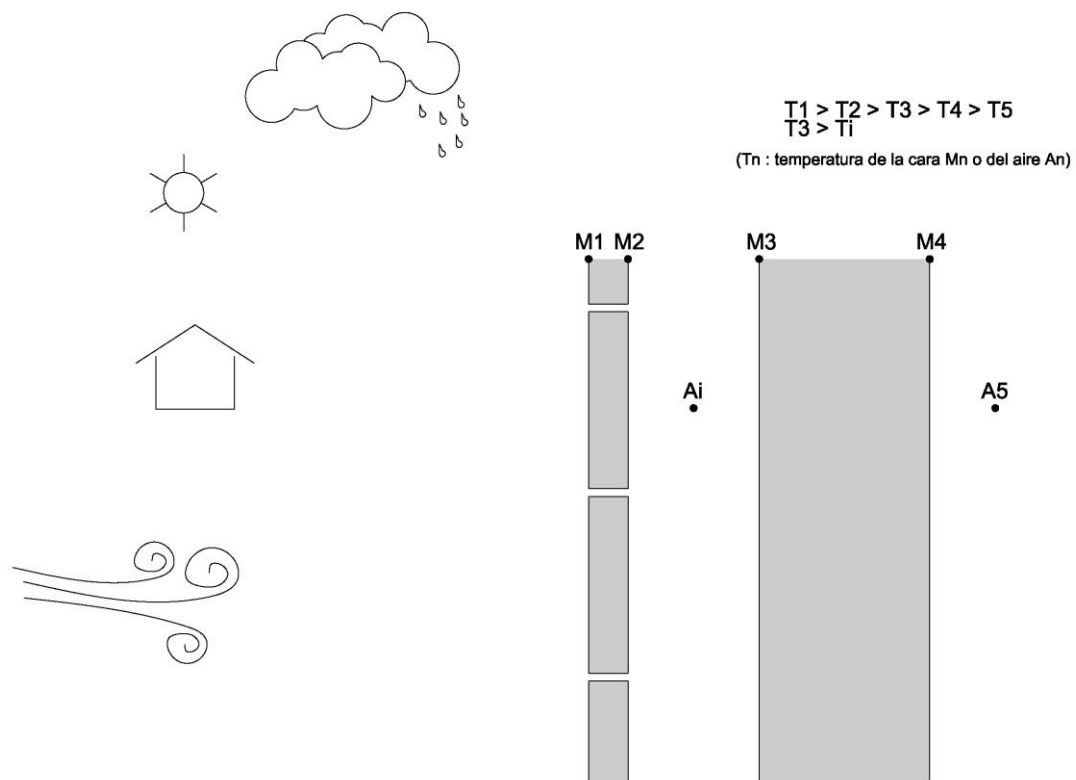
Además, distintas configuraciones de aberturas se verán afectadas por el viento de manera distinta. En las CJVF las presiones y succiones de viento que afectaran a los caudales de la cámara son la presión del punto superior y la del punto inferior (en las aberturas), mientras que en las OJVF son las que recibe toda la fachada.

## 5. DESCRIPCIÓN DE FLUJOS ENERGÉTICOS Y MOVIMIENTO DEL AIRE

### 5.1. Bases del estudio energético

En primer lugar, puesto que en este capítulo voy a hacer referencia continuamente a cada una de las caras de las dos hojas de fachada y sería muy complejo describirlas cada vez, voy a simplificarlo con una nomenclatura similar a la que se usa para nombrar las caras de los vidrios dobles:

- $M_1$ : cara exterior de la hoja exterior
- $M_2$ : cara interior de la hoja exterior
- $M_3$ : cara exterior de la hoja interior
- $M_4$ : cara interior de la hoja interior



**Figura 30:** Denominación de cada una de las caras de la fachada ventilada. Fuente: elaboración propia

Siguiendo con esta nomenclatura, cuando se haga referencia a  $T_1$ , será la temperatura superficial de  $M_1$ , en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2$  lo será de  $M_2$ , y así sucesivamente.

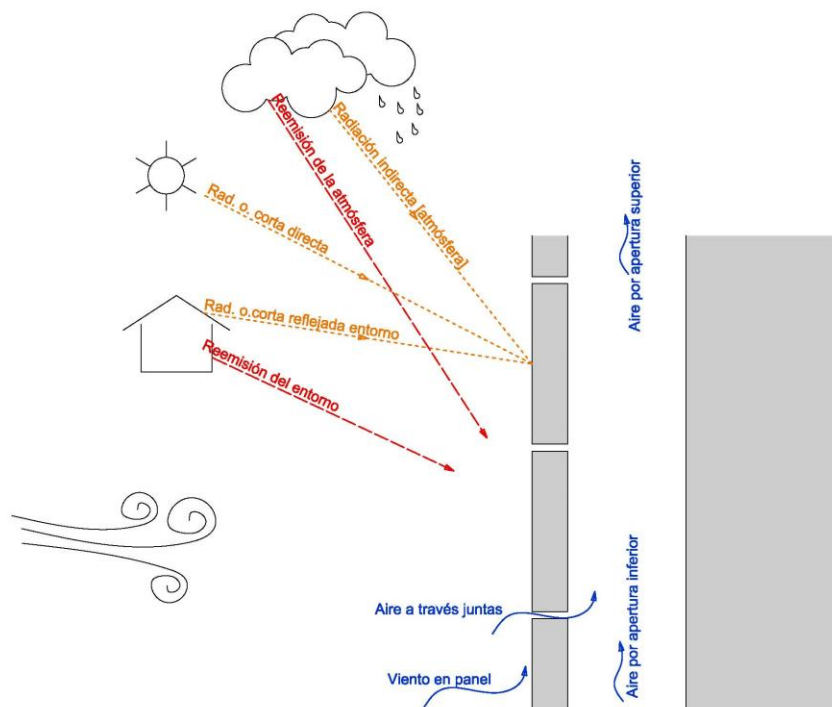
Se considera la fachada en estado estacionario (cuyas variables que definen el comportamiento permanecen constantes a lo largo del tiempo). Aunque algunas variables (sobre todo la radiación y el viento) cambian a lo largo del día, podemos simplificarlo como estacionario por el hecho de considerar un periodo corto y sus valores medios durante este periodo.

Hay diversos estudios que analizan el flujo del aire en la cámara con programas de CFD (Computational Fluid Dynamics), pero mucho de ellos dicen que implican largos tiempos de simulación [3] [7] [8], además de la complejidad y conocimientos que requieren. Esto hace que las herramientas basadas en esos sistemas sean mucho menos asequibles, como una guía de diseño y

proyecto, para un público amplio. Por este motivo, y teniendo en mente que la complejidad de un modelo depende del tipo de preguntas que estemos buscando responder [28], considero que en este estudio se puede hacer una simplificación importante. Se basa en el hecho de que aunque el movimiento del aire en la cámara sea turbulento y muy variable, en este caso no nos interesa conocer el movimiento del aire en detalle sino su efecto refrigerante sobre las superficies de los materiales que componen la fachada. Este efecto térmico es mucho más lento y se puede relacionar con las velocidades medias más que con las velocidades en cada instante de tiempo. De esta forma se simplifica mucho la herramienta de cálculo, y podemos programarlo con una Hoja de Cálculo.

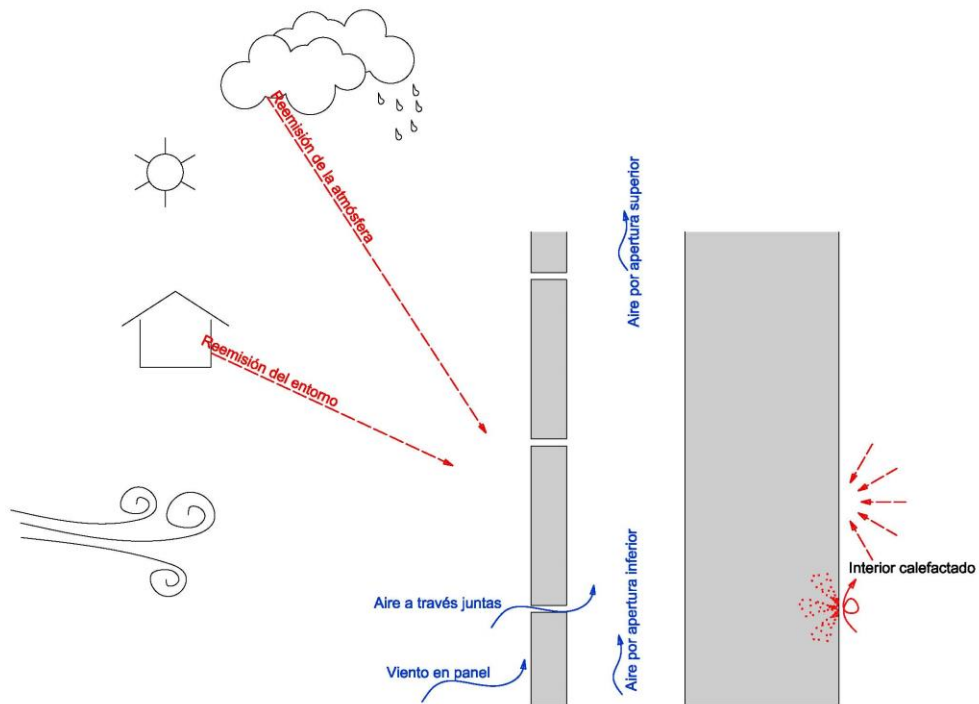
La fachada considerada, en estado estacionario, se encuentra en equilibrio energético por lo que el balance energético de cada una de las superficies es 0 y su temperatura no cambia durante este período de tiempo. Se estudia un  $m^2$  de fachada soleada donde  $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$ . En caso que en alguna situación las temperaturas se inviertan en alguna de estas desigualdades, el razonamiento seguirá siendo el mismo, pero cambiando de sentido los flujos energéticos correspondientes.

A los flujos energéticos anteriormente mencionados hay que añadir un flujo material, que es uno de los temas clave de la fachada ventilada: la renovación del aire del interior de la cámara. Esta renovación del aire del interior por aire exterior a otra temperatura afecta al comportamiento energético de la fachada. En la situación que se estudia, fachada soleada, el aire renovado puede disipar parte del calor que llega al interior de la cámara. Se denomina  $T_i$  a la temperatura media del aire en la cámara del fragmento de fachada estudiado  $V_i$  a su velocidad media,  $V_e$  y  $T_e$  a la velocidad y temperatura del aire en el exterior, a 80cm de  $M_1$  [9]. Los flujos energéticos se nombran para  $T_i > T_e$  y  $T_3 > T_i$ . En algunos casos se pueden invertir estas desigualdades, por lo que también se invertirán los signos de algunos flujos. En la figura siguiente se grafían los flujos de aire y los flujos de aporte de energía al sistema en situación de fachada soleada.



**Figura 31:** Imagen resumen de los aportes energéticos y flujos de aire en fachada soleada. Fuente: elaboración propia

En las situaciones sin radiación solar, es posible que las desigualdades de temperaturas antes mencionadas se inviertan, sobretodo en casos de invierno con interior calefaccionado. De este modo los flujos energéticos de ganancias cambia, y aparecen aportes energéticos del espacio interior por el hecho de estar a mayor temperatura que el exterior.



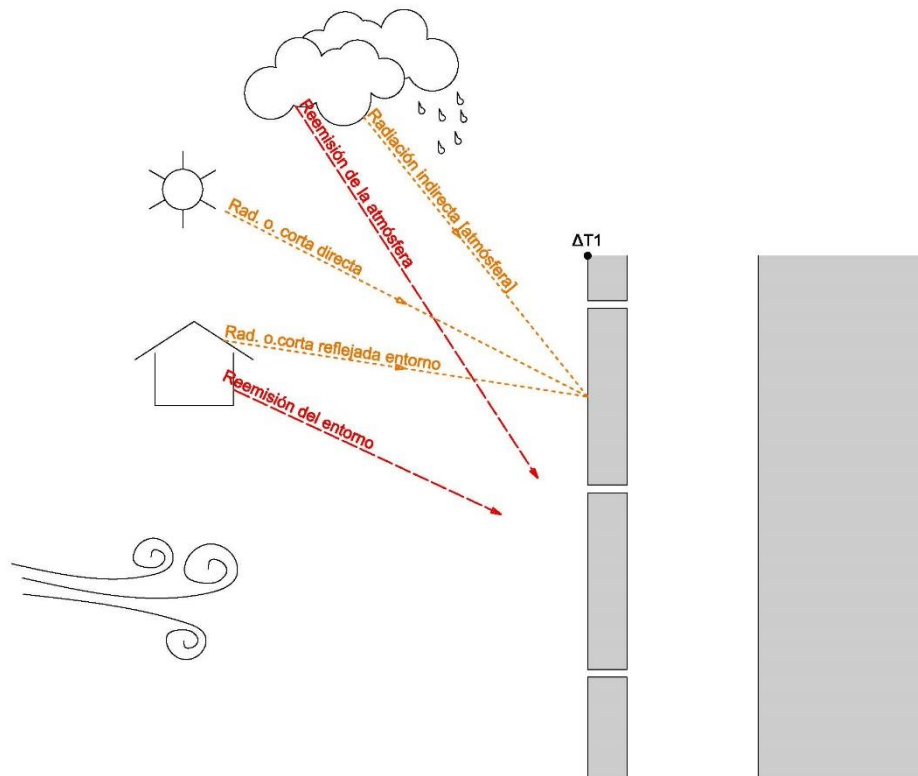
**Figura 32:** Imagen resumen de los aportes energéticos y flujos de aire en fachada no soleada con interior calefactado.

Fuente: elaboración propia

## 5.2. Flujos energéticos en cada una de las caras

Para hacer más comprensible la exposición de los flujos lo he dividido en cuatro fases dependiendo de si son ganancias o pérdidas de cada una de las caras.

### 5.2.1. Ganancias energéticas de $M_1$



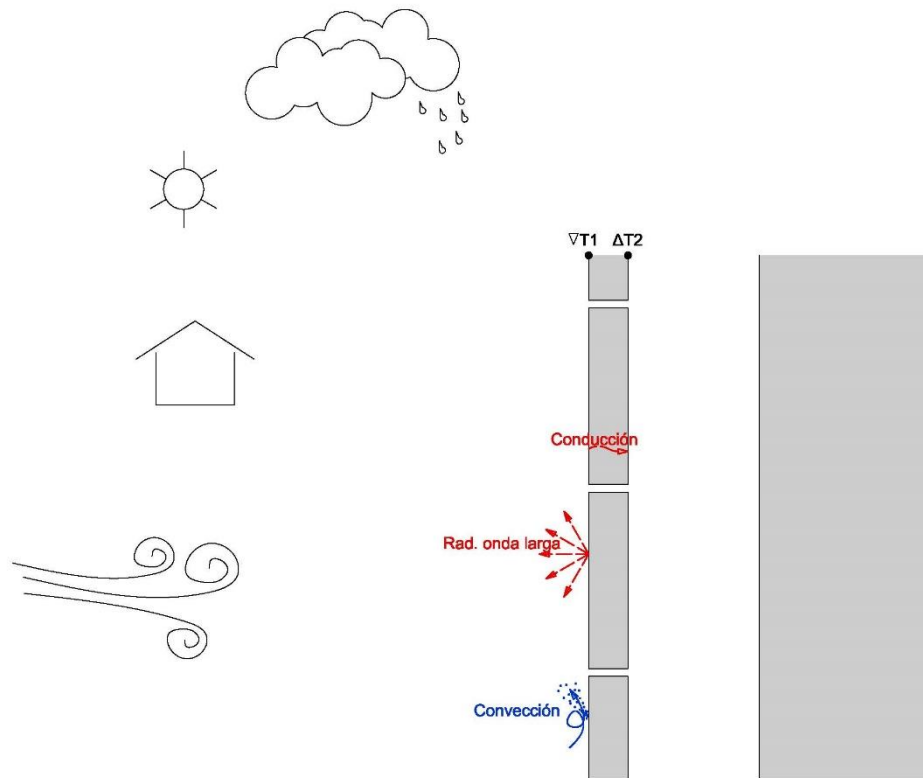
**Figura 33:** Ganancias energéticas de  $M_1$ . Fuente: elaboración propia

Cuando  $M_1$  recibe radiación solar (de onda corta) puede hacerlo por tres vías (no excluyentes): directa, reflejada por el entorno y reflejada por la atmósfera o difusa. Además de la directa, se tendrá que tener en cuenta sobretodo la reflejada por el entorno, pues tal como apuntan algunos artículos [20] la reflejada por el suelo puede ser de gran magnitud, y al no ser homogénea sobre toda la fachada puede hacer que la parte inferior de la fachada esté más caliente que la parte superior, afectando así a los flujos de aire generados por diferencia de temperatura.

La superficie  $M_1$  también recibe la radiación infrarroja (de onda larga) que emite su entorno y la atmósfera.

Todas estas ganancias energéticas hacen subir la temperatura  $T_1$ .

### 5.2.2. Pérdidas energéticas de $M_1$ y ganancias energéticas de $M_2$



**Figura 34:** Pérdidas energéticas de  $M_1$  y sus relativas ganancias energéticas de  $M_2$ . Fuente: elaboración propia

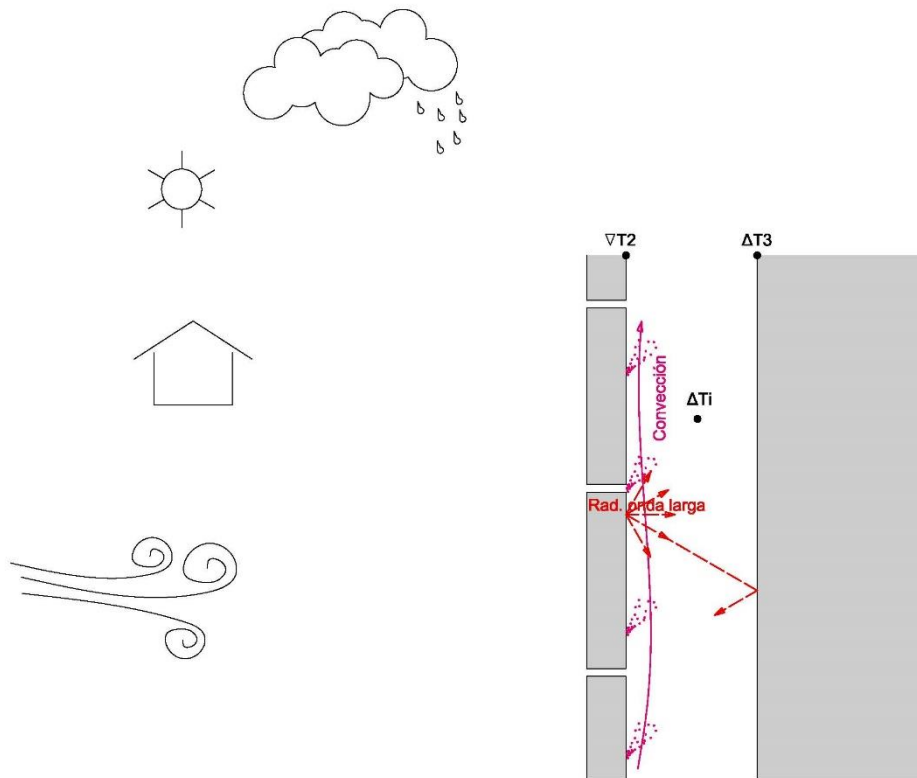
El aumento de temperatura de  $M_1$  supone una diferencia de temperatura con  $M_2$ , por lo que inmediatamente se inicia un flujo energético por conducción a través del grosor de la hoja exterior.

Según la ley de Stefan-Boltzman todo cuerpo emite energía en forma de radiación infrarroja en función de su temperatura, por lo que  $M_1$  también perderá energía por esta vía.

Y finalmente, por el hecho de estar en contacto con el aire exterior, muchas veces en movimiento, también perderá energía por convección.

Estos flujos suponen un aumento de  $T_2$  y una disminución de  $T_1$ .

### 5.2.3. Pérdidas energéticas de $M_2$ y ganancias energéticas de $M_3$



**Figura 35:** Pérdidas energéticas de  $M_2$  y sus relativas ganancias energéticas de  $M_3$ . Fuente: elaboración propia

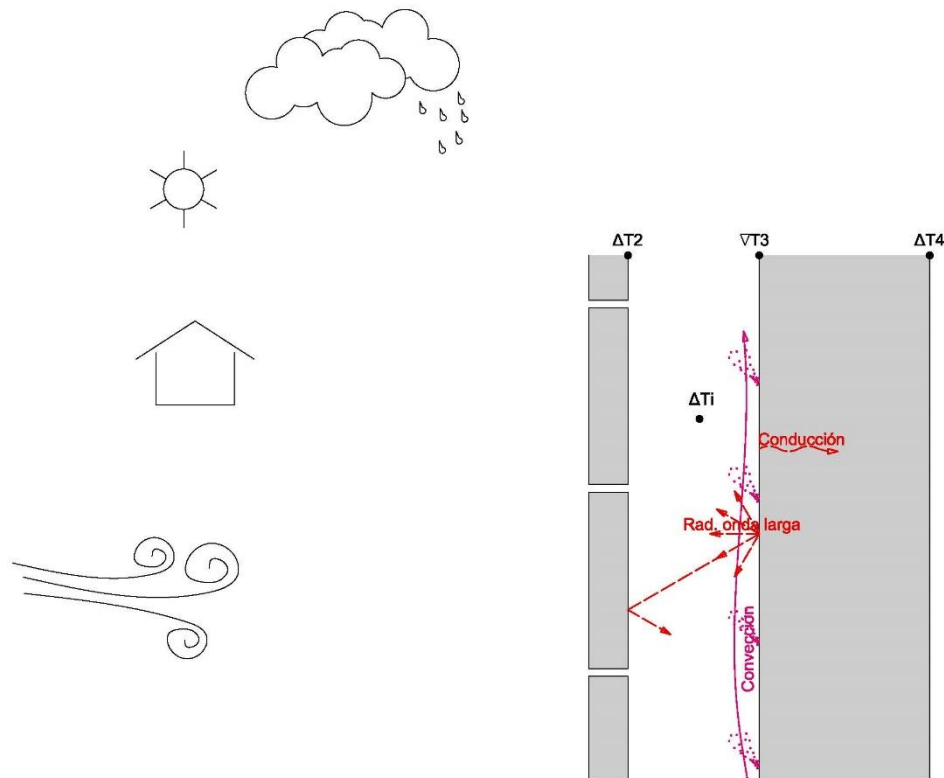
Igual que  $M_1$ , la superficie  $M_2$  también emitirá radiación infrarroja en función de su temperatura. Esta radiación incidirá sobre la superficie  $M_3$ , parte de esta energía será absorbida y el resto será reflejado otra vez hacia  $M_2$ .

$M_2$  también perderá energía por convección hacia el aire del interior de la cámara, lo que provocará que se caliente dicho aire.

Estos flujos suponen un aumento de  $T_3$  y  $T_i$ , y una disminución de  $T_2$ .



#### 5.2.4. Pérdidas energéticas de $M_3$ y ganancias energéticas de $M_4$



**Figura 36:** Pérdidas energéticas de  $M_3$  y ganancias energéticas de  $M_4$ . Fuente: elaboración propia

Finalmente,  $M_3$  también emitirá radiación infrarroja en función de su temperatura. Esta radiación incidirá sobre  $M_2$ , parte de esta energía será absorbida y el resto será reflejado otra vez hacia  $M_3$ .

$M_3$  también perderá energía por convección hacia el aire del interior de la cámara, lo que hará que se caliente este aire. Puesto que esta cara de la hoja interior suele estar definida por la superficie del aislamiento térmico, es importante señalar que en este caso se considera que dicho aislamiento no es permeable al aire, por lo que no se produce el “*wind washing*” del que hablan algunos artículos [26], donde el aire se mueve por el interior del aislamiento poroso y se produce intercambio energético en todo, o parte, del grosor del aislamiento.

Debido a la diferencia de temperatura entre  $M_3$  y  $M_4$ , se producirá un flujo de calor por conducción hacia el espacio interior. Este flujo será en lo que deberemos fijarnos a la hora de comparar diversas soluciones de fachada ventilada entre ellas o con otros tipos de fachada.

Todos estos flujos suponen un aumento de  $T_4$ ,  $T_2$  y  $T_i$ , y una disminución de  $T_3$ .

#### 5.3. Desarrollo numérico de cada uno de los tipos de flujo energético

Tal como se ha dicho anteriormente, el sentido de los flujos energéticos se ha concretado para:

- $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$
- $T_3 > T_i$
- $T_i > T_e$

En caso de invertirse alguna de estas desigualdades se invertiría también el sentido de dicho flujo energético, pero el razonamiento seguiría siendo el mismo.

Además de saber el sentido y el tipo del flujo, será muy importante saber los factores que afectan a dichos flujos y las expresiones que los relacionan. Se han clasificado a continuación en función del tipo de flujo energético.

### 5.3.1. Radiación de onda corta

Como ya se apunta en el subapartado anterior, a  $M_1$  llega radiación solar de forma directa, reflejada del entorno y difusa por la atmósfera. Considerando solamente la componente perpendicular de cada una de ellas  $I_d$ ,  $I_e$ ,  $I_a$  respectivamente, en  $W/m^2$ , la capacidad de absorber esta energía viene condicionada por la absorptividad de la superficie ( $\alpha_1$ ) a estas longitudes de onda. Se explican cada uno de los parámetros de las expresiones siguientes en el listado de abreviaturas y símbolos del inicio del documento.

$$\text{Radiación onda corta absorbida por } M_1 = \alpha_1 * (I_d + I_e + I_a)$$

Aunque en muchos casos la más importante será la radiación solar directa, es importante tener en cuenta las tres fuentes, pues tal como apunta [20] algunas veces la reflexión del entorno de manera no homogénea sobre la fachada podrá modificar el funcionamiento de la fachada.

### 5.3.2. Radiación de onda larga

Según la ley de Stefan-Boltzman, un cuerpo emitirá energía en forma de radiación infrarroja en función de su temperatura absoluta. Sigue la siguiente expresión, aplicada a la emisión de  $M_1$ .

$$\text{Radiación onda larga emitida por } M_1 = \varepsilon_1 * \sigma * (T_{k1})^4$$

Donde encontramos la constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5,67 * 10^{-8} W/m^2 K^4$ ) y la emisividad a onda larga de la superficie ( $\varepsilon_1$ )

Puesto que la temperatura que se considera en esta expresión es en Kelvin, para facilitar la nomenclatura aparece la denominación  $T_{k1}$ , que es la temperatura de la superficie  $M_1$  en K, a diferencia de  $T_1$  que es en  $^{\circ}C$ , por lo que se relacionan según la siguiente expresión.

$$T_{k1} = T_1 + 273,15$$

No hay que olvidar que esta expresión sólo tiene en cuenta la radiación en onda larga que emite dicho cuerpo, pero este cuerpo también va a recibir lo que emiten los cuerpos de su alrededor. El mismo parámetro de emisividad también servirá para saber la capacidad de la superficie de absorber esta energía recibida.

$$\begin{aligned} \text{Radiación onda larga absorbida por } M_1 \\ = \varepsilon_1 * \text{Radiación onda larga recibida por } M_1 \end{aligned}$$

Puesto que todos los materiales que vamos a tratar son opacos al infrarrojo, la energía que no absorben la reflejan (si tuvieran algún grado de transparencia tendríamos que tener en cuenta la energía que los atraviesa).

$$\begin{aligned} \text{Radiación onda larga reflejada por } M_1 \\ = (1 - \varepsilon_1) * \text{Radiación onda larga recibida por } M_1 \end{aligned}$$

### 5.3.3. Conducción, a través de sólidos

Puesto que las dos caras de las hojas de fachada están a diferente temperatura, a través de dichas hojas se producirá un flujo energético de la cara caliente a la cara fría, según la siguiente expresión.

$$\text{Flujo energético por conducción entre } M_1 \text{ y } M_2 = U_{1-2} * (T_1 - T_2)$$

Donde  $U_{1-2}$  (W/m<sup>2</sup>K) es la transmitancia térmica de las capas comprendidas entre  $M_1$  y  $M_2$ . En caso que la hoja esté formada por diversas capas, esta resistividad se calculará con las siguientes expresiones. Donde  $e_n$  (en metros) es el espesor de cada una de las capas, y  $\lambda_n$  (W/mK) la conductividad térmica de la capa.

$$R = \frac{1}{U}$$

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

### 5.3.4. Convección, entre un sólido y el aire en contacto

La convección es el intercambio de calor entre una superficie y el fluido en contacto. Se calcula con la siguiente expresión, aplicada en este caso para el flujo energético de  $M_2$  hacia el aire de la cámara.

$$\text{Flujo energético de } M_2 \text{ hacia el aire de la cámara} = h_2 * (T_2 - T_i)$$

En este caso, habrá que conocer el coeficiente de convección  $h_2$  (W/m<sup>2</sup>K). Según lo que explica [9, p. 113], basándose en un artículo de Martín Monroy, podemos encontrar el coeficiente de convección mixta en la cámara (natural y forzada simultáneamente), sin radiación, con las siguientes expresiones. Aunque el primer artículo no especifica cuál es el límite superior de velocidad para el que se puede utilizar la segunda expresión, sí concreta que en ningún caso tiene velocidades mayores a 3,5m/s, así que mientras en nuestro caso no superemos este límite podremos seguir su mismo razonamiento.

$$v < 1,5 \text{ m/s} \quad h_2 = 0,85 * \left( 1,959 + 1,517 * \sqrt[3]{|T_2 - T_i|} + 1,33 * V_i \right)$$

$$v > 1,5 \text{ m/s} \quad h_2 = 0,85 * \left( 1,959 + 1,517 * \sqrt[3]{|T_2 - T_i|} - 8,29 + 8,05 * V_i^{0,605} \right)$$

En el caso de  $M_1$ , el coeficiente  $h_1$ , también depende de la velocidad del movimiento del aire. En este caso, igual que [9, p. 105], se ha usado la expresión de Liu, que utiliza el viento medido sobre una zona próxima a la superficie del edificio ( $U_s$ ). Para estos valores de viento [9] lo mide a 80cm de la fachada.

La expresión propuesta por Liu, válida para valores de  $U_s$  inferiores a 5m/s, es la siguiente:

$$h_c = 3,32 + 6,31 * U_s$$

## 6. CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA

### 6.1. Balance energético de cada una de las superficies

Conociendo las expresiones desarrolladas en el capítulo anterior podremos representar todos los flujos introducidos anteriormente. Recordemos que la herramienta analiza una fachada en estado estacionario en equilibrio energético, por lo que el balance energético de cada una de las superficies es cero: ganancias = pérdidas.

#### 6.1.1. Balance 0 de la superficie M<sub>1</sub>

Ya hemos visto que las ganancias de M<sub>1</sub> son por efecto de la radiación de onda corta y de la radiación de onda larga, mientras que sus pérdidas son por radiación de onda larga, convección con el aire exterior y conducción hacia M<sub>2</sub>.

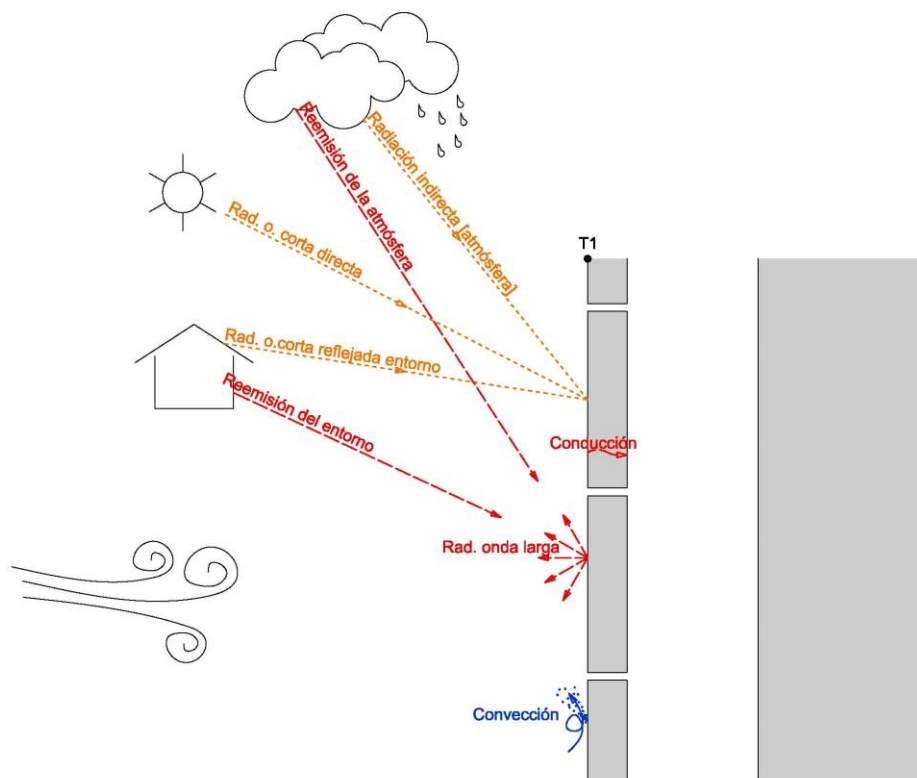


Figura 37: Esquema de flujos energéticos de la superficie M<sub>1</sub>. Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, la ecuación de balance energético quedaría así:

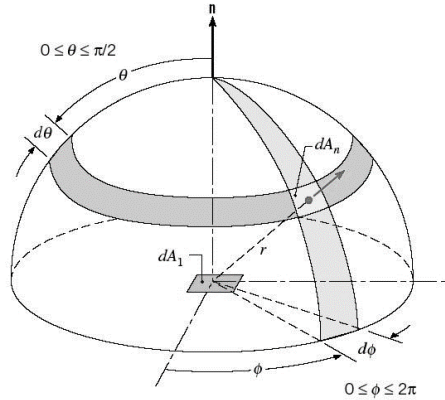
$$\text{Rad. o. corta absorbida} + \text{Rad. o. larga absorbida} = \text{Rad. o. larga emitida} + \text{Conv. aire exterior} + \text{Cond. a } M_2$$

Si la desarrollamos con las expresiones del apartado anterior queda de la siguiente forma:

$$\alpha_1 * (I_d + I_e + I_a) + \epsilon_1 * \text{Rad. o. larga recibida} = \epsilon_1 * \sigma * (T_{k1})^4 + h_1 * (T_1 - T_e) + U_{1-2} * (T_1 - T_2)$$

Nos faltará definir cuál es la radiación de onda larga recibida.

La expresión utilizada para la emisión de onda larga considera que dicho punto emite en todas las direcciones de la misma manera, pero hay que tener en cuenta que este punto forma parte de una superficie, por lo que emite únicamente hacia el exterior de dicha superficie:  $2\pi$  estereorradianes o media esfera.

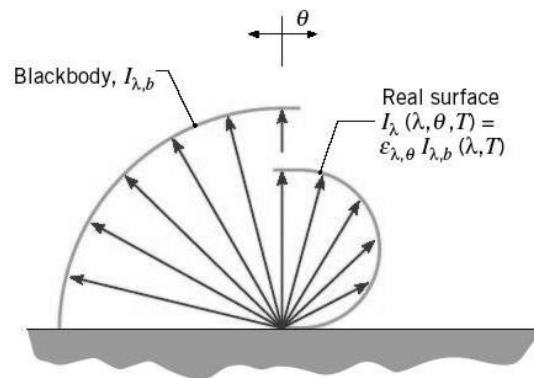


**Figura 38:** Emisión desde una porción diferencial de superficie hacia una hipotética semiesfera centrada en dicho diferencial de sup. Fuente: Fundamentals of heat and mass transfer, figura 12.9. Incropera-Bergman-Lavine-Dewitt

De la misma forma, la radiación de onda larga también la recibe desde todas las direcciones. Pero puesto que el entorno no estará todo a la misma temperatura, se tendrá que aproximar qué porcentaje de ángulo sólido ocupa cada uno de los elementos del entorno. Aparece el factor  $f_w$  para cada uno, de manera que la suma de todos estos factores será 100% ( $2\pi$ ). Habrá que tener en cuenta que el suelo también entra dentro del “campo visual” del punto estudiado.

$$f_{w \text{ sky}} + f_{w \text{ suelo}} + f_{w \text{ entorno } 1} + f_{w \text{ entorno } 2} + \dots + f_{w \text{ entorno } n} = 100\%$$

Para ser más precisos, se debería tener en cuenta además que esta emisión no es igual en todas las direcciones de esta semiesfera, sino que depende del ángulo de incidencia (y lo mismo se aplicaría a la absorción de dicha dirección). Pero considero que puesto que es complicado ser preciso definiendo los límites del entorno, el hecho de considerar esta disminución no será relevante, y la complejidad añadida por el hecho de considerarla no supondría un aumento de precisión remarcable.



**Figura 39:** Comparación en la distribución direccional de la emisión de un cuerpo negro y de una superficie real. Fuente: Fundamentals of heat and mass transfer, figura 12.15. Incropera-Bergman-Lavine-Dewitt

Aplicándolo a la fórmula anterior:

$$\alpha_1 * (I_d + I_e + I_a) + \epsilon_1 * \sigma * [\epsilon_{sky} * (T_{k sky})^4 * f_{w sky} + \epsilon_{ent} * (T_{ent 1})^4 * f_{w ent 1} + \epsilon_{ent} * (T_{ent 2})^4 * f_{w ent 2}] = \epsilon_1 * \sigma * (T_{k1})^4 + h_1 * (T_1 - T_e) + U_{1-2} * (T_1 - T_2)$$

### 6.1.2. Balance 0 de M<sub>2</sub>

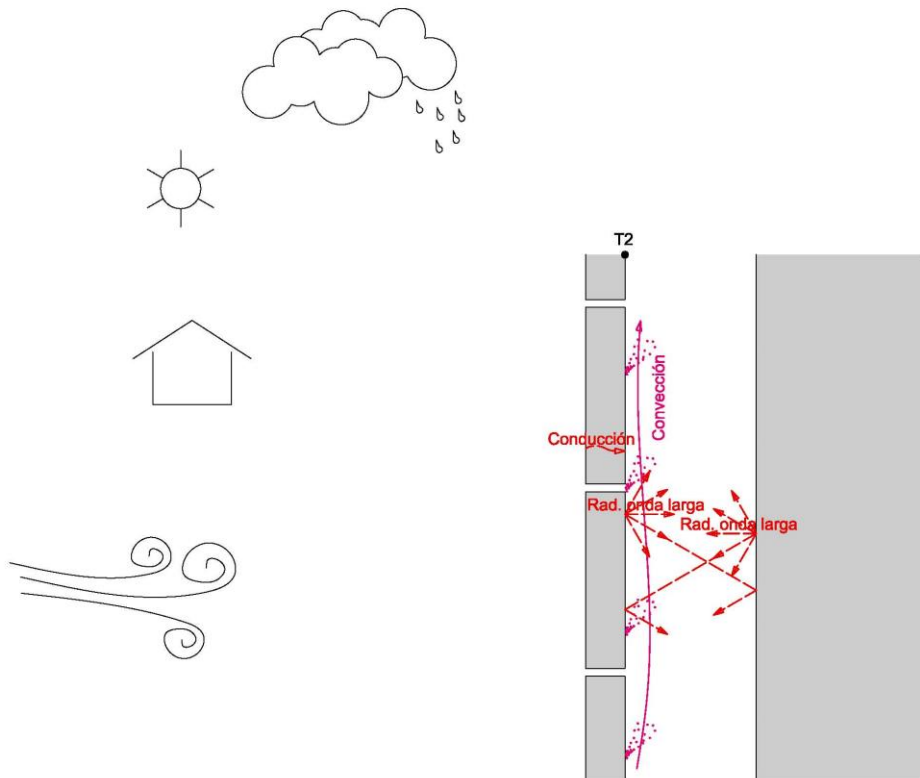


Figura 40: Esquema de flujos energéticos de la superficie M<sub>2</sub>. Fuente: elaboración propia

Siguiendo el mismo razonamiento, podemos expresar el balance energético de M<sub>2</sub> de la siguiente manera:

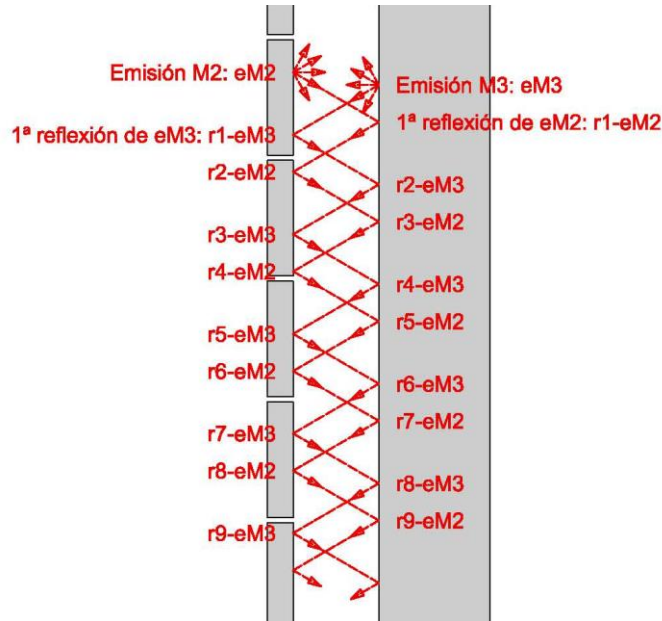
$$\text{Cond. de } M_1 + \text{Rad. o. larga absorbida} = \text{Rad. o. larga emitida} + \text{Conv. aire interior cámara}$$

Desarrollando con las expresiones del apartado anterior:

$$U_{1-2} * (T_1 - T_2) + \text{Rad. o. larga absorbida} = \text{Rad. o. larga emitida} + h_2 * (T_2 - T_i)$$

En este momento tenemos que valorar las emisiones-absorciones-reflexiones de M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub>. Con una absorptividad a infrarrojos de un 100% no habría ninguna reflexión, con lo cual lo que emite M<sub>2</sub> lo absorbería M<sub>3</sub>. Pero ya que ningún material constructivo actúa como un cuerpo negro ideal, se tendrá que considerar el hecho de que lo que no absorbe una superficie lo refleja de vuelta a la primera. Puesto que las emisividades de la mayoría de los materiales de construcción son alrededor de 0,9 podría considerar 3 reflexiones entre estas superficies a la hora de programar la hoja de

cálculo, pero esto impediría que pudiera tener en cuenta metales u otras superficies bajo emisivas con dicha herramienta. Por este motivo he considerado 9 reflexiones entre las superficies:



**Figura 41:** Esquema de reflexiones entre  $M_2$  y  $M_3$ . Fuente: elaboración propia

$$\text{Rad. o. larga absorbida } M_2 = \varepsilon_2 * (\text{Rad que llega a } M_2)$$

O lo que es lo mismo:

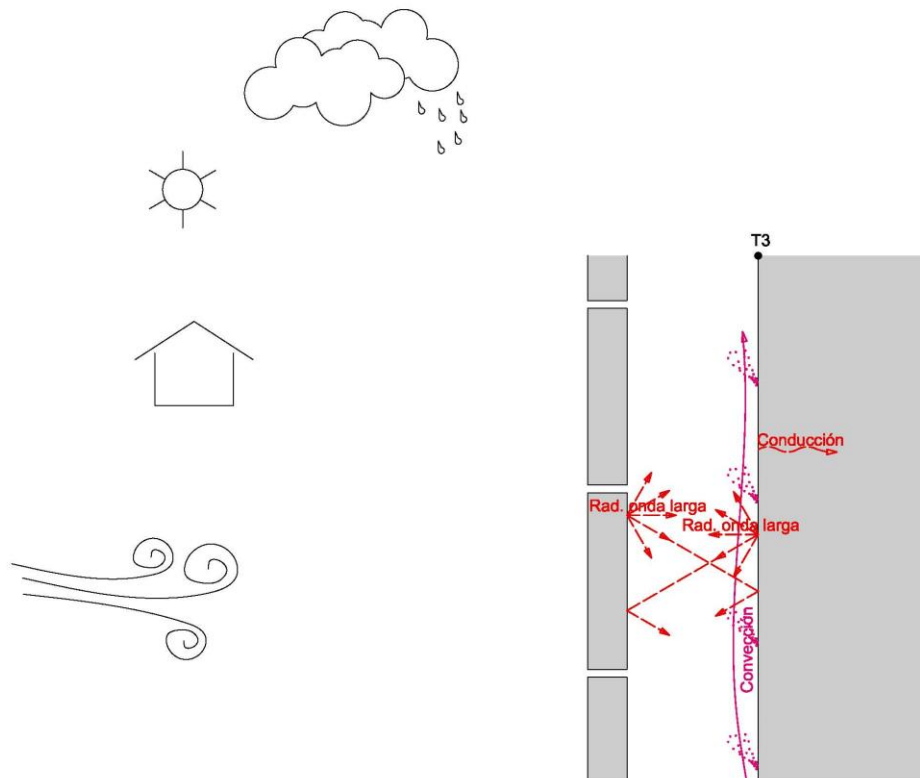
$$\begin{aligned} \text{Rad. o. larga absorbida } M_2 &= \varepsilon_2 (eM_3 + r_1 eM_2 + r_2 eM_3 + r_3 eM_2 + r_4 eM_3 + r_5 eM_2 + r_6 eM_3 + r_7 eM_2 \\ &+ r_8 eM_3 + r_9 eM_2) \end{aligned}$$

Con la siguiente expresión básica podemos encontrar cada uno de los valores de las reflexiones, para así introducirlo en la hoja de cálculo:

$$\text{Rad. incidente} = \text{Rad. absorbida} + \text{Rad. reflejada}$$

$$\text{Rad. incidente} = \varepsilon * \text{Rad. incidente} + (1 - \varepsilon) * \text{Rad. incidente}$$

### 6.1.3. Balance 0 de $M_3$



**Figura 42:** Esquema de flujos energéticos de la superficie  $M_3$ . Fuente: elaboración propia

Siguiendo el mismo razonamiento, podemos expresar el balance 0 de  $M_3$  de la siguiente manera:

$$\text{Rad. o. larga absorbida} = \text{Rad. o. larga emitida} + \text{Conv. aire interior cámara} + \text{Cond. a } M_4$$

Desarrollando la expresión con las del apartado anterior:

$$\text{Rad. o. larga absorbida} = \text{Rad. o. larga emitida} + h_3 * (T_3 - T_i) + U_{3-5} * (T_3 - T_5)$$

En este caso  $U_{3-5}$  ya tiene en cuenta la resistencia superficial interior de la hoja interior, con lo cual el intercambio se considera directamente con el aire del espacio interior, cuya temperatura es  $T_5$ .

El tema de las reflexiones de radiación de onda larga entre  $M_2$  y  $M_3$  sigue el mismo desarrollo del apartado anterior.

### 6.2. Cálculo de $T_i$

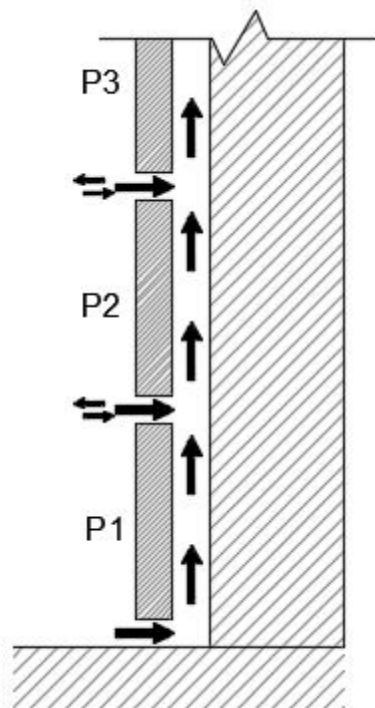
Algunas de las expresiones anteriores tienen en cuenta la temperatura del aire en el interior de la cámara en el tramo estudiado, pero este parámetro es complejo calcularlo debido al desconocimiento de la velocidad y la renovación de este aire.

En este punto es donde la mayoría de herramientas utilizan el CFD. Yo opto por hacer una simplificación basándome en el hecho de que lo que nos interesa no es conocer en detalle las turbulencias del aire, sino su efecto de intercambio energético con las superficies y su capacidad de disipar calor de la cámara hacia el exterior. De esta manera, como los efectos térmicos son más



lentos que las turbulencias que se generan en la cámara, no nos afectarán tanto las velocidades instantáneas sino los valores medios. Esta simplificación considero que es clave para poder seguir adelante y no quedarse bloqueado en las complicaciones de las dinámicas de fluidos que tanto dificultan a otros estudios y en algunos casos impiden avanzar.

La herramienta considera un tramo vertical de fachada y lo asimila a un conducto vertical, con diversas aberturas que lo comunican con el exterior, ya sea como entradas o como salidas de aire. Conociendo la velocidad del aire detrás de cada placa se puede encontrar el tiempo que está el aire detrás de cada una de las placas, y sabiendo la diferencia de temperaturas entre el aire y las superficies en contacto, podremos calcular el calentamiento que se ha producido en este volumen de aire.



**Figura 43:** Esquema de la hipótesis de circulación de aire considerada, en la parte inferior de la fachada. Fuente: elaboración propia

Explicado paso a paso, la herramienta considera que cuando la fachada recibe radiación, y el aire del interior de la cámara está más caliente que el del exterior, por la primera junta inferior entra un caudal de aire a temperatura ambiente y asciende por la cámara detrás de la placa 1, calentándose hasta llegar a la junta entre la placa 1 y la placa 2. Al llegar a la junta este aire se mezcla con el caudal de aire que entra a través de la junta y también se produce una cierta renovación del aire de la cámara por efecto de las turbulencias en la junta. Combinando todos estos volúmenes de aire y sus temperaturas tendremos el caudal y la temperatura del aire que ascenderá por la cámara de la segunda placa, donde volveremos a calcular la velocidad y por lo tanto el tiempo que está calentándose detrás de la placa hasta llegar a la tercera junta. Y así sucesivamente hasta llegar a la parte superior de la cámara. En todos los casos se supondrá que por la junta entra aire, y si el signo resultante es negativo querrá decir que no entra sino que sale. En este caso, la hoja de cálculo la he programado para una fachada de 30 placas de altura.

El hecho de que algunos de los efectos dependan de otros, y a la vez los modifiquen hace que algunos de los cálculos se hayan tenido que solucionar con cálculos iterativos. Se da en los dos casos siguientes:

- Los flujos energéticos dependen de las temperaturas de cada una de las superficies, pero éstos a su vez las modifican si no está en equilibrio.
- Los flujos de aire dependen de las diferencias de temperatura, pero esta renovación afecta a las diferencias de temperaturas.

Estas mismas situaciones de cálculos “en bucle” pueden hacer que el siguiente razonamiento sea confuso por aparente falta de datos, pero una vez terminado el apartado, se comprende el conjunto.

### 6.2.1. Calentamiento de aire en contacto con dos superficies más calientes, a temperatura constante

La velocidad del aire de la cámara afecta al coeficiente de convección  $h_2$  y  $h_3$  tal como se ha explicado anteriormente. Conocido este coeficiente y la diferencia de temperaturas inicial entre el aire y las superficies con las que intercambia energía podremos saber el flujo de intercambio en cada instante. A partir de aquí, y sabiendo la densidad y calor específico del aire, podemos saber a qué ritmo se calienta. Este calentamiento aplicado durante todo el tiempo que lleva el aire en la cámara nos dará como resultado su temperatura final.

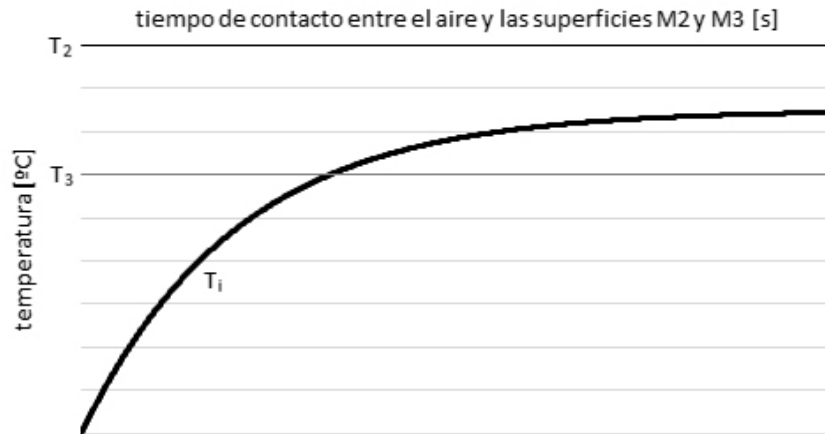
$$\text{Aumento de temperatura} = \frac{\text{Energía aportada durante el periodo}}{\text{Masa térmica}}$$

$$\Delta T = \frac{(h_2 * (T_2 - T_i) + h_3 * (T_3 - T_i)) * \text{superficie} * t_{\text{periodo}}}{\rho_{\text{aire}} * C_{e\text{aire}} * Vol_{\text{aire}}}$$

Quizás se puede entender más fácilmente la relación entre los parámetros de la expresión anterior con sus unidades:

$$^{\circ}C = \frac{\left( W/m^2K * (^{\circ}C - ^{\circ}C) + W/m^2K * (^{\circ}C - ^{\circ}C) \right) * m^2 * h}{kg/m^3 * Wh/kgK * m^3}$$

El problema es que este proceso de calentamiento del aire de la cámara no se realiza de manera lineal, puesto que a mayor diferencia de temperatura entre el aire y las superficies, mayor es el flujo de calor; pero conforme las temperaturas del aire y de las superficies se van igualando, el flujo es menor y disminuye el ritmo de calentamiento del aire.



**Figura 44:** Gráfico cualitativo de la temperatura de un fluido en función del tiempo que lleva en contacto dos superficies a temperatura constante. Fuente: elaboración propia

Puesto que la expresión anterior solo sirve cuando sus valores son constantes, y en este caso la temperatura del aire no lo es, no se podrá aplicar la fórmula directamente con el valor del periodo de tiempo que está el aire en el interior de la cámara. Se tendrá que dividir el proceso en periodos suficientemente cortos, asimilando la curva de calentamiento de la gráfica anterior a una sucesión de muchas rectas.

Aunque en la hoja de cálculo se permite variar esta fracción de tiempo, en todos los casos he considerado una centésima de segundo, puesto que considero que se trata de una división suficientemente pequeña (comparada con los tiempos que va a estar el aire dentro de la cámara) como para que el margen de error entre la curva real y esta asimilación de rectas tenga un error mínimo.

Para facilitar la formulación se definen las siguientes equivalencias:

- $\Delta Z$ : diferencia de temperaturas entre  $M_2$  y  $M_3$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) Recordemos que como la fachada está recibiendo radiación solar en  $M_1$ ,  $T_2 > T_3$ .
- $\Delta T_{i0}$ : Diferencia de temperatura entre  $M_2$  y el aire de la cámara en el instante 0 ( $^{\circ}\text{C}$ ). Este aire, por definición, está a la misma temperatura que el aire exterior.
- $\Delta T_{i1}$ : Diferencia de temperatura entre  $M_2$  y el aire de la cámara en el instante 1 ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $\Delta T_{in}$ : Diferencia de temperatura entre  $M_2$  y el aire de la cámara en el instante n ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- M: Masa térmica del aire de  $1\text{m}^2$  de cámara, dividida por 1h y multiplicada por el número de instantes considerados durante esta hora ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ). Aunque este parámetro quizás no tenga mucho sentido físico, y el número de instantes esté más ligado al coeficiente de convección que a la masa térmica, se agrupa así para facilitar la notación.

Por lo tanto podremos expresar este calentamiento, instante a instante, como:

$$\Delta T_{i1} = \Delta T_{i0} - \frac{h_2}{M} \Delta T_{i0} - \frac{h_3}{M} (\Delta T_{i0} - \Delta Z)$$

Desarrollado:

$$\Delta T_{i1} = \Delta T_{i0} - \frac{h_2}{M} \Delta T_{i0} - \frac{h_3}{M} \Delta T_{i0} + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

Y finalmente:

$$\Delta T_{i1} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

El siguiente instante sería:

$$\Delta T_{i2} = \Delta T_{i1} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

Combinándolo con la expresión del instante anterior:

$$\Delta T_{i2} = \left(\Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z\right) * \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

Desarrollado:

$$\Delta T_{i2} = \left(\Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z\right) * 1 - \left(\Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z\right) * \left(\frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

$$\Delta T_{i2} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z - \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) * \left(\frac{h_2 + h_3}{M}\right) - \frac{h_3}{M} \Delta Z * \left(\frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

$$\Delta T_{i2} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) * \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) - \frac{h_3}{M} \Delta Z * \left(\frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

$$\Delta T_{i2} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^2 + \frac{h_3}{M} \Delta Z - \frac{h_3}{M} \Delta Z * \left(\frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

Finalmente:

$$\Delta T_{i2} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^2 + \frac{h_3}{M} \Delta Z \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

Lo mismo se podría hacer para el instante 3:

$$\Delta T_{i3} = \Delta T_{i2} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

$$\Delta T_{i3} = \left[\Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^2 + \frac{h_3}{M} \Delta Z \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z\right] * \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

Finalmente:

$$\Delta T_{i3} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^3 + \frac{h_3}{M} \Delta Z \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^2 + \frac{h_3}{M} \Delta Z \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) + \frac{h_3}{M} \Delta Z$$

O lo que es lo mismo:

$$\Delta T_{i3} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^{3-0} + \frac{h_3}{M} \Delta Z \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^{3-1} + \frac{h_3}{M} \Delta Z \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^{3-2} + \frac{h_3}{M} \Delta Z \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^{3-3}$$

De donde podemos sacar la expresión en el instante n:

$$\Delta T_{in} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n + \frac{h_3}{M} \Delta Z * \left[ \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^{n-1} + \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^{n-2} + \dots + \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^1 + \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^0 \right]$$

La parte de la expresión anterior que está entre corchetes es una progresión geométrica (que para mayor comprensión invertiremos de orden), de manera que podremos sumar todos sus parámetros con la siguiente expresión:

$$S_n = \frac{a_n * r - a_1}{r - 1}$$

Donde:

$$a_1 = \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^0 = 1$$

$$a_n = \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^{n-1}$$

$$r = \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)$$

Por lo que:

$$S_n = \frac{\left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^{n-1} * \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) - 1}{\left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right) - 1}$$

$$S_n = \frac{\left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - 1}{-\frac{h_2 + h_3}{M}}$$

Por lo tanto, podremos substituir esta expresión por todo el corchete:

$$\Delta T_{in} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n + \frac{h_3}{M} \Delta Z * \left[ \frac{\left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - 1}{-\frac{h_2 + h_3}{M}} \right]$$

$$\Delta T_{in} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - \frac{h_3}{M} \Delta Z * \left[ \frac{\left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - 1}{\frac{h_2 + h_3}{M}} \right]$$

$$\Delta T_{in} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - \frac{\frac{h_3}{M}}{\frac{h_2 + h_3}{M}} \Delta Z \left[ \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - 1 \right]$$

$$\Delta T_{in} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - \frac{h_3}{h_2 + h_3} \Delta Z \left[ \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - 1 \right]$$

$$\Delta T_{in} = \Delta T_{i0} \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n - \frac{h_3}{h_2 + h_3} \Delta Z \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n + \frac{h_3}{h_2 + h_3} \Delta Z$$

$$\Delta T_{in} = \left(\Delta T_{i0} - \frac{h_3}{h_2 + h_3} \Delta Z\right) * \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n + \frac{h_3}{h_2 + h_3} \Delta Z$$

Finalmente, la expresión usada para conocer la temperatura del aire en la cámara, después de un tiempo definido dentro de ella es la siguiente:

$$\Delta T_{in} = \left(1 - \frac{h_2 + h_3}{M}\right)^n * \left(\Delta T_{i0} - \frac{h_3}{h_2 + h_3} \Delta Z\right) + \frac{h_3}{h_2 + h_3} \Delta Z$$

Con esta expresión, una vez sepamos la velocidad media del aire detrás de cada una de las placas, podremos calcular su temperatura en los diferentes puntos.

### 6.3. Cálculo de Vi y la renovación del aire de la cámara

En el apartado anterior se explica cómo calcular la temperatura del aire en la cámara sabiendo su velocidad media y el tiempo que está detrás de cada placa. Por lo tanto, será necesario conocer como circula el aire por la cámara y por las juntas: conocer su caudal y velocidad en cada punto.

#### 6.3.1. Efecto chimenea

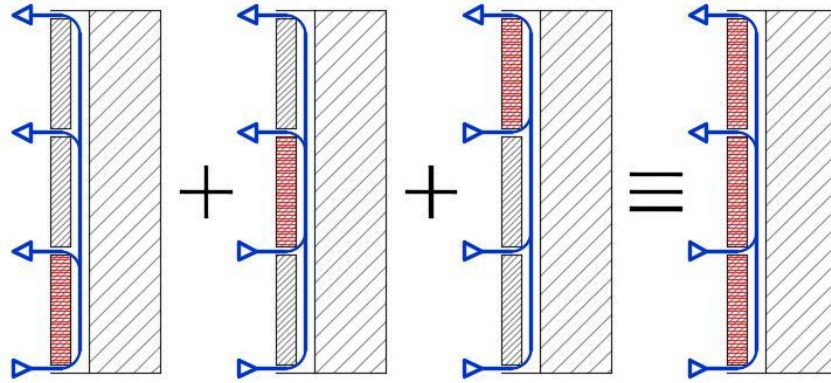
Como se ha dicho anteriormente, consideramos un tramo vertical de fachada y lo asimilamos a un conducto vertical, con diversas aberturas que lo comunican con el exterior, que funcionarán como entradas y salidas de aire. La diferencia de temperatura, y por lo tanto de densidad, entre el aire del interior de la cámara y la del exterior hace que el aire caliente tienda a subir y el aire frío a ocupar el espacio que éste ha dejado. Este efecto es mayor cuanto mayor sea la diferencia de temperatura.

En el caso de las OJVF los flujos de aire son más complicados que en las CJVF [7]. En este último caso el caudal es constante a lo largo de toda la cámara, pues solo hay una entrada y una salida, pero en el caso de las OJVF no es tan sencillo. Tal como apuntan algunos artículos, el calentamiento de las placas produce un flujo ascendente no homogéneo en la cámara, que entra por las juntas inferiores y sale por las juntas superiores [6], otros concretan que sin importar el número de juntas el flujo de aire entra por las juntas de la mitad inferior de la fachada, y sale de la cámara por las juntas de la mitad superior [20].

Otros autores en cambio afirman que el papel de la junta abierta puede ser considerado negligible en las condiciones medidas [3] [25], aunque considero que en este caso es difícil extrapolar el resultado a un caso más general.

Incluso algunos autores dicen que las juntas abiertas disminuyen la capacidad de reducir las cargas térmicas de la fachada ventilada durante el verano, pues el efecto chimenea es menor que en las CJVF [21]. Cabe decir que esta afirmación la hace basándose en un caso sin viento exterior, en un caso con viento podría cambiar la conclusión.

Para poder calcular el efecto conjunto de la fachada y a la vez poder saber el caudal a través de cada una de las juntas en el caso de las OJVF, he dividido el cálculo teniendo en cuenta el efecto de cada una de las placas. De esta manera, una vez conocido el efecto individual, se pueden sumar los efectos y encontrar el global.



**Figura 45:** Esquema de la combinación de flujos generados por la diferencia de temperatura del aire de la cámara detrás de cada una de las placas. Fuente: elaboración propia

Este efecto se analiza en diversas fases. En primer lugar se calcula la diferencia de presión generada por dicha diferencia de densidad. Posteriormente se buscan qué caudales genera esta diferencia de presión, teniendo en cuenta la resistencia al flujo que ofrecen las superficies que limitan el canal.

#### 6.3.1.1. Diferencia de presión generada por una placa

La fuerza generada por la diferencia de densidad debida a la diferente temperatura se puede expresar con la siguiente expresión:

$$F = \Delta\rho * g * Vol$$

Donde F es la fuerza generada ( $N = kg \cdot m/s^2$ ),  $\Delta\rho$  es la diferencia de densidad entre el aire frío y el caliente ( $kg/m^3$ ), g es la gravedad ( $9,807 m/s^2$ ), y Vol es el volumen de aire considerado ( $m^3$ ) (en este caso, el volumen de la cámara detrás de una placa). Podemos calcular la densidad del aire con la siguiente expresión [32], que aunque es válida de 300K a 350K, aproximadamente de 27°C a 77°C, se pueden extender ligeramente sus límites sin tener un gran error:

$$\rho_{air} = 1,1614 - 0,00353 * (T_{air} - 300)$$

Si consideramos todo el aire detrás de una placa y aplicamos las dos fórmulas obtendremos la fuerza que ejerce sobre la columna de aire el volumen de aire situado detrás de la placa considerada. Si dividimos esta fuerza por la sección del canal de fachada que estudiamos, tendremos la diferencia de presión que genera dicha fuerza.

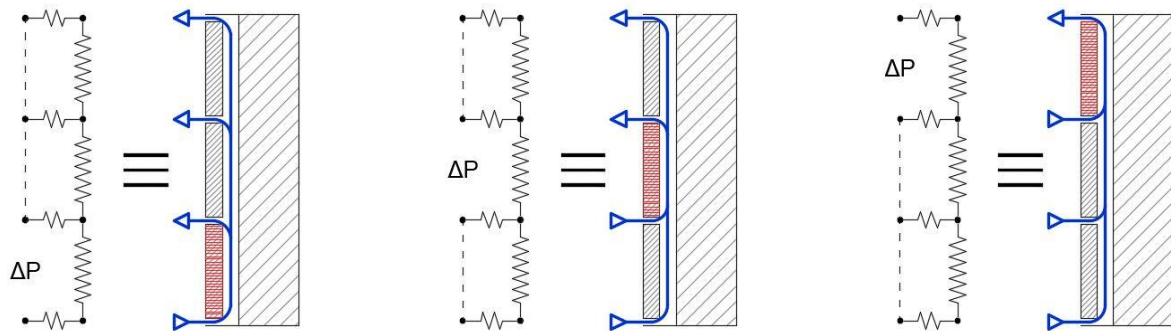
$$F = \Delta\rho * g * Vol$$

$$\Delta P = \frac{F}{e_c * b_p} = \frac{\Delta\rho * g * Vol}{e_c * b_p} = \frac{\Delta\rho * g * (e_c * h_p * b_p)}{e_c * b_p}$$

$$\Delta P = \Delta\rho * g * h_p$$

#### 6.3.1.2. Caudales generados por una diferencia de presión

Para saber cuánto caudal de aire genera esta diferencia de presión, asimilaremos el canal vertical del tramo de fachada estudiado a un circuito eléctrico, donde los distintos tramos de conducto se representaran como resistencias, por su oposición a la circulación de aire. Esta asimilación está inspirada en el tipo de representación que usa K. S. Ong en su artículo [32].



**Figura 46:** Asimilación de las resistencias de cámara a las de un circuito eléctrico. Fuente: elaboración propia

Partimos de una de las expresiones básicas de los circuitos eléctricos, donde la diferencia de voltaje es igual a la intensidad por la resistencia.

$$\Delta V = I * R$$

Basándose en la ecuación de Bernoulli y la caída de presión debida a la fuerzas viscosas [33, p. 381], donde  $I_v$  es el caudal másico (kg/s) y  $R$  es la resistencia al flujo (1/sm), podemos expresarlo así. De esta forma se entiende mejor el procedimiento posterior de suma de resistencias en serie y en paralelo.

$$\Delta P = I_v * R$$

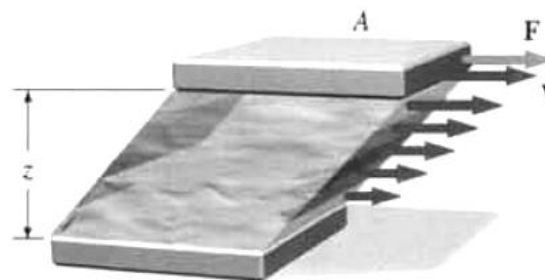
El caudal másico (kg/s) se puede definir como la sección del conducto  $S$  (m<sup>2</sup>), por la velocidad media  $v$  (m/s), por la densidad del fluido  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>):

$$I_v = \rho * v * S$$

### 6.3.1.3. Resistencia al flujo en la junta y en la cámara

Para definir la resistencia al flujo de aire en la cámara o a través de las juntas, podemos asimilarlo a la resistencia que se opone al movimiento de una placa respecto otra placa de igual área separada por un fluido viscoso. La fuerza necesaria para mover la primera placa a una cierta velocidad  $v$  (m/s) es directamente proporcional al coeficiente de viscosidad dinámica  $\mu$  (kg/sm), la velocidad  $v$  (m/s) y el área de las superficies  $A$  (m<sup>2</sup>), e inversamente proporcional a la separación  $z$  (m) entre dichas superficies [33, p. 382].

$$F = \mu * \frac{v * A}{z}$$



**Figura 47:** Fluido viscoso entre dos placas, una de ella en movimiento. Fuente: Física para la ciencia y la tecnología, Tipler-Mosca



En este caso, puesto que es el aire el que se mueve, y se produce rozamiento con las dos superficies adyacentes, podemos considerar que la que se mueve es una “placa virtual” situada en la parte central de la cámara, y arrastra el aire de ambos lados. Por lo tanto la fuerza será el doble que la anterior, y la distancia entre dicha placa y las superficies de la cámara será la mitad del espesor de la cámara.

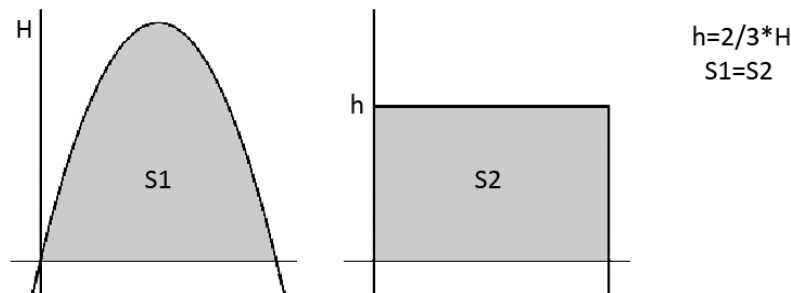
$$F_{\text{rozamiento detrás placa}} = 2 * \mu * \frac{v_{\text{max cámara}} * A_{\text{placa}}}{e_{\text{cámara}}/2} = 4 * \mu * \frac{v_{\text{max cámara}} * b_{\text{placa}} * h_{\text{placa}}}{e_{\text{cámara}}}$$

Y si lo pasamos a diferencia de presión:

$$\Delta P_{\text{rozamiento detrás placa}} = \frac{F_{\text{rozamiento detrás placa}}}{e_{\text{cámara}} * b_{\text{placa}}}$$

$$\Delta P_{\text{rozamiento detrás placa}} = 4 * \mu * \frac{v_{\text{max cámara}} * h_{\text{placa}}}{e_{\text{cámara}}^2}$$

La velocidad máxima se produce en el punto central del conducto. Considero que la distribución de velocidades en el espesor de la cámara, más que disminuir linealmente al acercarse a los extremos, se puede aproximar a una parábola. Para encontrar la velocidad media de la sección podríamos hacer la integral de dicha función, y encontrar el rectángulo con la misma base y la misma área. Este rectángulo es el que tiene una altura 2/3 a la altura de la parábola. Este mismo factor 2/3 nos servirá para encontrar la velocidad media en la sección.



**Figura 48:** Relación de alturas entre parábola y rectángulo de misma base y superficie. Fuente: elaboración propia

$$v_{\text{media}} = \frac{2}{3} * v_{\text{max}}$$

Si aplicamos la fórmula del rozamiento al paso a través de la junta:

$$F_{\text{rozamiento a través junta}} = 2 * \mu * \frac{v_{\text{max junta}} * A_{\text{canto junta}}}{e_{\text{junta}}/2}$$

$$= 4 * \mu * \frac{v_{\text{max junta}} * b_{\text{placa}} * e_{\text{placa}}}{e_{\text{junta}}}$$

$$\Delta P_{\text{rozamiento a través junta}} = \frac{F_{\text{rozamiento a través junta}}}{e_{\text{junta}} * b_{\text{placa}}}$$

$$\Delta P_{\text{rozamiento a través junta}} = 4 * \mu * \frac{v_{\text{max junta}} * e_{\text{placa}}}{e_{\text{junta}}^2}$$

Combinado estas expresiones con las del apartado anterior, en el caso de la resistencia detrás de la placa:

$$4 * \mu * \frac{v_{\max \text{ cámara}} * h_{\text{placa}}}{e_{\text{cámara}}^2} = I * R_{\text{placa}}$$

$$4 * \mu * \frac{v_{\max \text{ cámara}} * h_{\text{placa}}}{e_{\text{cámara}}^2} = \rho * v_{\text{media cámara}} * S * R_{\text{placa}}$$

$$4 * \mu * \frac{v_{\max \text{ cámara}} * h_{\text{placa}}}{e_{\text{cámara}}^2} = \rho * v_{\text{media cámara}} * e_{\text{cámara}} * b_{\text{tramo}} * R_{\text{placa}}$$

$$4 * \mu * \frac{v_{\max \text{ cámara}} * h_{\text{placa}}}{e_{\text{cámara}}^2} = \rho * \frac{2}{3} v_{\max \text{ cámara}} * e_{\text{cámara}} * b_{\text{tramo}} * R_{\text{placa}}$$

$$R_{\text{placa}} = 6 * \frac{\mu}{\rho} * \frac{h_{\text{placa}}}{e_{\text{cámara}}^3} * b_{\text{tramo}}$$

Y en la junta:

$$R_{\text{junta}} = 6 * \frac{\mu}{\rho} * \frac{e_{\text{placa}}}{e_{\text{junta}}^3} * b_{\text{tramo}}$$

#### 6.3.1.4. Combinación de resistencias en serie y en paralelo

Una vez definido el valor de cada una de las resistencias, se podrán sumar en serie y en paralelo estas resistencias, para ver cuál es la resistencia total que debe vencer el aire, en cada una de las situaciones, para ponerse en movimiento.

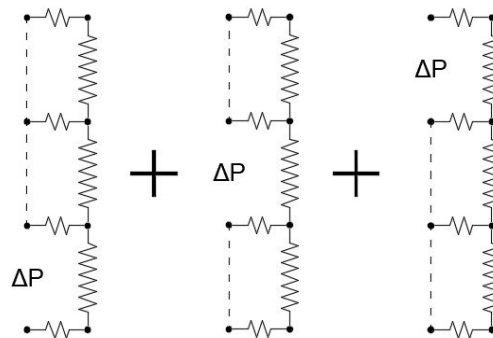
Suma de resistencias en serie:

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Suma de resistencias en paralelo:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

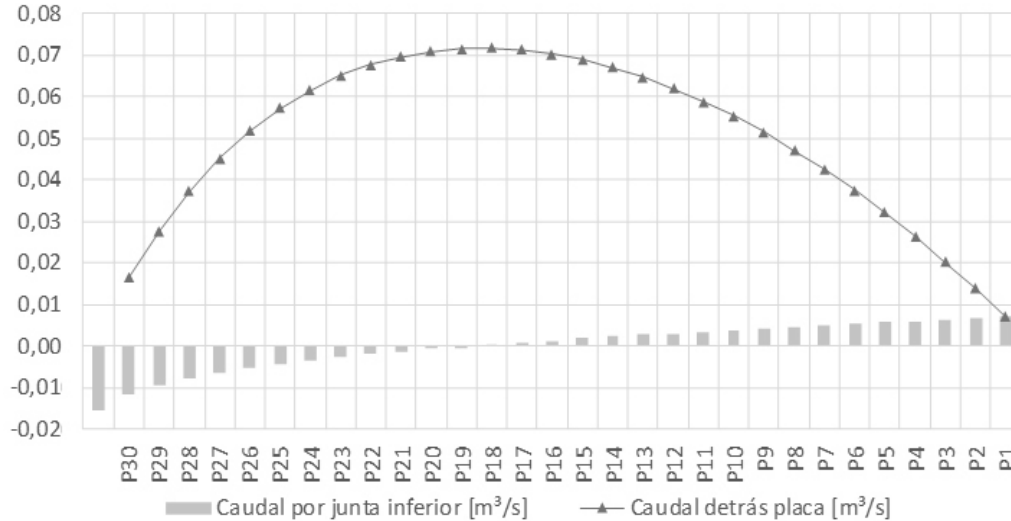
Este proceso se aplicará a cada una de las placas, y una vez encontradas los caudales máscos en todos los puntos debidos a cada una de las placas se combinarán los efectos.



**Figura 49:** Esquema de la fachada ventilada como asimilación a un circuito eléctrico. Fuente: elaboración propia

A la hora de hacer la combinación, será importante tener en cuenta el signo del caudal, para saber así el sentido del flujo. Se definirá como positivo el flujo ascendente por la cámara y el flujo de entrada a través de las juntas, y como negativo el flujo descendente por la cámara y el flujo de salida a través de las juntas.

Este es el resultado de un ejemplo de aplicación de este método en una OJVF, para comprobar que cualitativamente es coherente con lo que describen otros artículos [3] [6] [7] [8] [19] [20] [23].



**Figura 50:** Caudales en diferentes puntos de una OJVF según la hoja de cálculo utilizada. Fuente: elaboración propia

### 6.3.2. Renovación de aire en las juntas debida al viento sobre una OJVF

Tal como dice [6], en las juntas de un OJVF se forman pequeños vórtices de recirculación. Por lo que planteo que se podrían asimilar a sucesivas entradas y salidas de aire del exterior a través de las juntas, generando pequeñas zonas de renovación del aire. Dichas entradas y salidas de aire podrían relacionarse con las diferencias de presión del viento en una cara y otra de la junta:

$$P_{ext} - P_{int} = \Delta P$$

En este caso la  $\Delta P$  vuelve a ser la fuerza de rozamiento que hay que vencer al mover el viento:

$$\Delta P_{rozamiento \ a \ traves \ junta} = 4 * \mu * \frac{v_{max \ junta} * e_{placa}}{e_{junta}^2}$$

La presión que ejerce el viento sobre hoja exterior es directamente proporcional a la densidad del aire y al cuadrado de su velocidad.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} * \rho_{air} * v^2$$

En la parte interior, en cambio, la velocidad que hay que considerar está afectada por el coeficiente de descarga; podemos atribuirle un valor de 0,6 según [28]. Juntando las expresiones quedaría así:

$$\frac{1}{2} * \rho_{air} * v_{viento}^2 - \frac{1}{2} * \rho_{air} * (0,6 * v_{max \ junta})^2 = 4 * \mu * \frac{v_{max \ junta} * e_{placa}}{e_{junta}^2}$$

$$\frac{\rho_{air}}{2} * (v_{viento}^2 - (0,6 * v_{max \ junta})^2) = 4 * \mu * \frac{v_{max \ junta} * e_{placa}}{e_{junta}^2}$$

$$\frac{\rho_{air} * e_{junta}^2}{8 * \mu * e_{placa}} * (v_{viento}^2 - 0,36 * v_{max\ junta}^2) = v_{max\ junta}$$

Si hacemos un cambio de variable para simplificar el desarrollo:

$$k = \frac{\rho_{air} * e_{junta}^2}{8 * \mu * e_{placa}}$$

$$k * (v_{viento}^2 - 0,36 * v_{max\ junta}^2) = v_{max\ junta}$$

$$k * v_{viento}^2 - 0,36 * k * v_{max\ junta}^2 - v_{max\ junta} = 0$$

$$0,36 * k * v_{max\ junta}^2 + v_{max\ junta} - k * v_{viento}^2 = 0$$

Tenemos una ecuación de segundo grado, donde:

$$a = 0,36 * \frac{\rho_{air} * e_{junta}^2}{8 * \mu * e_{placa}} \quad b = 1 \quad c = -\frac{\rho_{air} * e_{junta}^2}{8 * \mu * e_{placa}} * v_{viento}^2$$

Y la incógnita es:

$$v_{max\ junta}$$

Recordemos que por el mismo razonamiento de la distribución parabólica de las velocidades dentro de la sección, la velocidad media es la siguiente:

$$v_{media} = \frac{2}{3} * v_{max}$$

Lo que nos interesa es encontrar el porcentaje de renovación del aire de la cámara en la junta debido a dicha velocidad. Planteo que podría ser directamente proporcional a la relación entre la abertura de la junta y el espesor de la cámara:

$$\frac{\%renovación}{100} = \frac{1}{4} * v_{media\ junta} * \frac{e_{junta}}{e_{cámara}}$$

Además se añade el  $\frac{1}{4}$  para tener en cuenta que no todo el tiempo estará entrando aire, sino que aproximadamente  $\frac{1}{4}$  del tiempo estará entrando, otro  $\frac{1}{4}$  estará saliendo, y el  $\frac{1}{2}$  restante es el periodo de cambio de sentido.

Como ya he apuntado anteriormente este razonamiento es una hipótesis que aunque se basa en expresiones de principios físicos o en informaciones de diversos estudios, debería validarse y comprobar si realmente funciona así. El hecho de que lo importante de este estudio no sea el movimiento del aire y sus turbulencias sino el efecto térmico que genera esta renovación, hace que esta hipótesis pueda ser tomada como algo potencialmente válido.

#### 6.4. Desfase térmico de M<sub>1</sub> a M<sub>2</sub>

Todos estos planteamientos se han hecho partiendo de un estado estacionario en equilibrio energético. Esta es una simplificación que podemos hacer únicamente para periodos cortos. Además de analizar la fachada en periodos cortos habrá que tener en cuenta que la inercia térmica de la hoja exterior puede hacer que el efecto de la radiación solar sobre M<sub>1</sub> tarde un tiempo en llegar a M<sub>2</sub>. Por lo que en ese periodo, la radiación que tendríamos que considerar no es la del mismo momento, sino la de un tiempo antes. Otros estudios ya apuntan a este desfase entre la radiación y la temperatura [5]. En este caso concreto [19] dice que la temperatura máxima obtenida

dentro de la cámara se da dos horas después de la radiación máxima. Considero que es difícil decir en cada caso exactamente cómo afecta este retardo a la variación del valor de radiación a tener en cuenta, de hecho podría hacerse un estudio completo sobre ello. Creo que al menos es importante saber el orden de magnitud de este retraso para los diversos tipos de aplacado que se comparan posteriormente en este documento.

#### 6.4.1. Desarrollo numérico

Tendremos en cuenta el espesor de la placa  $e_p$  (m) la densidad  $\rho_p$  (kg/m<sup>3</sup>), el calor específico  $Ce_p$  (J/kgK) y la conductividad térmica de la placa  $\lambda_p$  (W/mK). En primer lugar buscaremos la difusividad térmica del material  $\alpha_{term-p}$ . Es muy importante que en este desarrollo todas las unidades sean en Sistema Internacional.

$$\alpha_{term-p} = \frac{\lambda_p}{Ce_p * \rho_p}$$

El desfase (en radianes) entre la temperatura en la cara exterior y la temperatura en la cara interior se expresa con la siguiente expresión, donde  $\tau$  es el periodo completo (en este caso un día, en segundos  $24*60*60 = 86400s$ ):

$$\sqrt{\frac{2\pi/\tau}{2\alpha_{term-p}}} * e_p = desfase \text{ (en radianes)}$$

Lo podremos pasar a unidad de tiempo dividiendo la expresión anterior por  $2\pi$  y multiplicando por  $\tau$ .

$$\sqrt{\frac{2\pi/\tau}{2\alpha_{term-p}}} * e_p * \frac{\tau}{2\pi} = desfase \text{ (en segundos)}$$

Si desarrollamos la expresión puede quedar más simplificada así:

$$desfase \text{ (en segundos)} = e_p * \sqrt{\frac{\tau}{4\pi\alpha_{term-p}}}$$

#### 6.4.2. Ejemplos

Podemos aplicar este razonamiento a los 4 distintos tipos de revestimiento que se van a comprobar en el capítulo 7, para tener un orden de magnitud del desfase térmico que hay entre las dos caras del revestimiento:

	<b>Madera</b>	<b>Piedra 1</b>	<b>Piedra 2</b>	<b>Composite Al.</b>
Espesor (m)	0,015	0,04	0,04	0,006
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	450	2400	2400	1200
Calor específico (J/kgK)	1600	1000	1000	880
Conductividad térmica (W/mK)	0,16	1,1	2,2	5,7
<b>Desfase (min)</b>	<b>44,0</b>	<b>81,7</b>	<b>57,7</b>	<b>3,6</b>

## 6.5. Explicación de la hoja de cálculo

Todas las expresiones de los apartados anteriores se han introducido en una hoja de cálculo para facilitar los cálculos. En ella se desarrolla cada uno de los flujos por separado y finalmente se combinan para llegar al balance 0 en cada una de las superficies. Este cálculo por partes permite analizar la influencia de cada uno de los flujos, de manera que sea posible compararlos entre ellos.

102	FIN							0,00	0,00
103	FIN	total onda larga M3	W/m <sup>2</sup>	X	0			17,43	17,73
104	FIN	conducción M3 a M4	W/m <sup>2</sup>	X	0			-5,92	-5,71
105	FIN	convección M3	W/m <sup>2</sup>	X	0			-11,51	-12,02

Navigation bar: intro | k | P30 | it-P30 | P29 | it-P29 | P28 | it-P28 | P27 ... (+)

Figura 51: Pestañas de la hoja de cálculo. Fuente: elaboración propia

La Hoja de Cálculo está formada por 62 pestañas distintas, agrupadas en 4 tipos, que se explican a continuación:

- Intro
- K
- Pn (P1, P2, P3, ..., P30)
- It-Pn (it-P1, it-P2, it-P3, ..., it-P30)

### 6.5.1. Pestaña “intro”

Esta es la pestaña más compleja. Por un lado tiene la introducción de datos, y por otro lado interrelaciona todas las pestañas y tiene en cuenta todos los cálculos parciales que se explican en los siguientes subapartados.

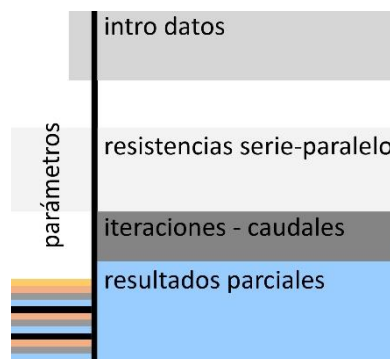


Figura 52: Esquema de la pestaña “intro”. Fuente: elaboración propia

Algunos de los parámetros que intervienen en ella son parámetros de entrada, otros son de cálculo y otros son de resultado final. La primera columna los clasifica por colores según:

amb	de entrada	ambientales y climáticos
cons	de entrada	constructivos y de entorno
c2		derivados de los constructivos
func		de funcionamiento
f2		derivados de los de funcionamiento
aux		auxiliares de cálculo
FIN	resultados finales	

Todos los parámetros de entrada que no se introducen en la pestaña “k” se introducen en esta pestaña, y las pestañas “Pn” están referenciadas a ellos. Cada una de las placas tiene una columna, y lo que sería la columna relativa a P31, es donde se hace referencia a la junta superior del tramo.

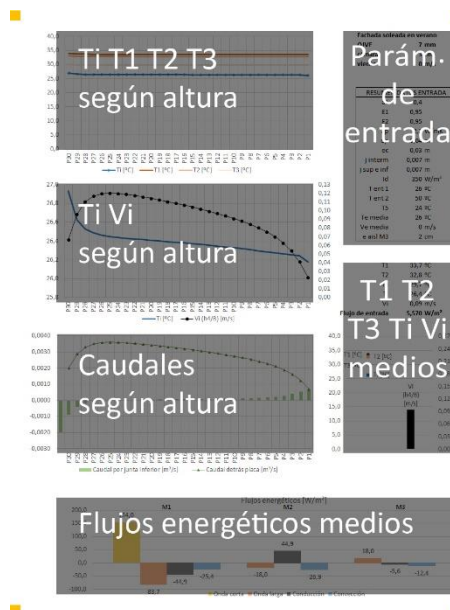
**Figura 53:** Pestaña “intro” de la hoja de cálculo. Fuente: elaboración propia



En la parte central de la tabla, en gris oscuro, encontramos uno de los cálculos recurrentes que había que resolver. Se trata de los caudales de aire generados por la diferencia de temperatura entre el aire de la cámara y el aire exterior. El cálculo recurrente se da porque el caudal depende de la diferencia de temperatura, pero esta renovación afecta a la diferencia de temperatura.

En este caso no he podido resolverlo encadenando cálculos, pues hubiera supuesto multiplicar el archivo completo diversas veces. La solución más sencilla que encontré fue hacer que el resultado del cálculo de caudales se diese automáticamente en las dos filas superiores de la zona gris oscuro, mientras que los valores de caudales que se utilizan para calcular las velocidades fueran las dos filas de la parte inferior. En la parte central se calcula la media aritmética entre los dos valores anteriores. De esta manera quedan desvinculados los cálculos y no dan problema en la hoja de cálculo. Lo que hay que hacer es copiar y pegar manualmente los valores de la parte central a la parte inferior (sólo los valores, sin copiar las fórmulas), tantas veces hasta que el margen de error sea inferior al deseado. En general con 12-15 ciclos de copiar-pegar el error se encuentra en el 5º decimal del valor de flujo de calor hacia el espacio interior, un error suficientemente pequeño para considerarse despreciable en este estudio. El problema de esta solución es que hace que los cálculos sean más laboriosos, pues cada cálculo supone 12-15 ciclos de copiar-pegar.

En la parte inferior de la tabla encontramos todos los flujos energéticos de cada una de las placas, así como también las temperaturas de cada una de ellas. Nos sirve para poder realizar los gráficos de funcionamiento del conjunto de la fachada, que es lo que nos sirve para comparar en detalle cada uno de los cálculos.



**Figura 54:** Esquema los gráficos de funcionamiento del conjunto de la fachada, situados en la parte inferior de la pestaña “intro”. Fuente: elaboración propia

En estas gráficas se analizan las temperaturas, velocidades y caudales en cada placa de la fachada, y también los valores medios del conjunto. A la derecha se listan los parámetros considerados en cada caso. En la parte inferior se grafían los flujos energéticos medios para poder compararlos entre ellos.

Todos estos elementos se encuadran dentro de un marco que permite exportar la imagen para conservar los cálculos parciales de diferentes cálculos realizados. Esto facilita poder comparar diversos cálculos realizados. Pero hay que tener en cuenta que como las gráficas se generan automáticamente y no tienen memoria de cálculos anteriores, si se han exportado los jpg sin haber comprobado los rangos de valores previamente, es probable que las gráficas no estén a la misma escala en todos los cálculos que se vayan a comparar.

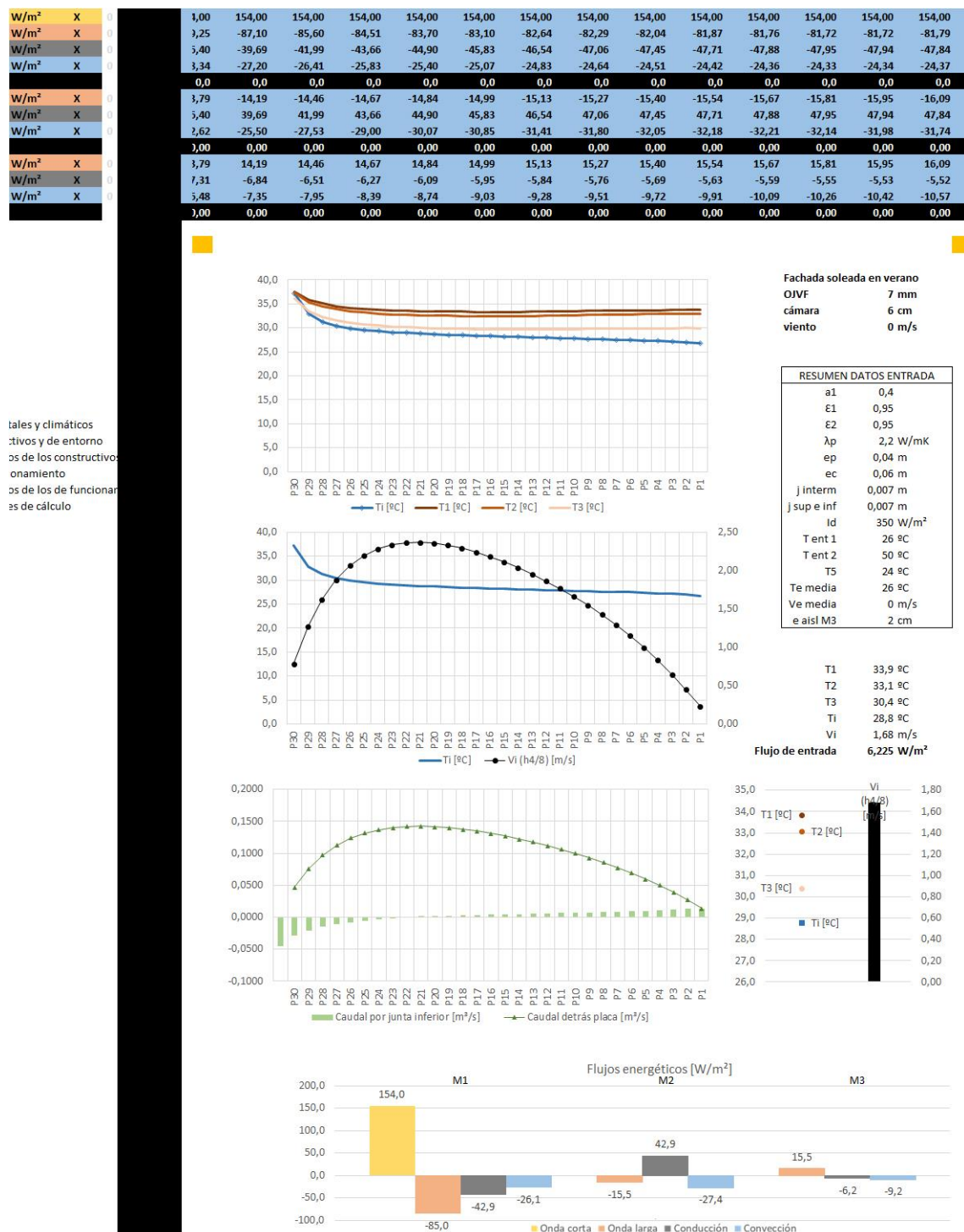


Figura 55: Gráficos de funcionamiento del conjunto de la fachada, situados en la parte inferior de la pestaña "intro".

Fuente: elaboración propia

### 6.5.2. Pestaña “k”

La pestaña “k” es la otra pestaña de introducción de datos. En ella se introducen valores que prácticamente en todos los casos son constantes para todos los tramos de una misma fachada, como parámetros del cielo y de la hoja interior.

Gravedad		m/s <sup>2</sup>	9,807 m/s <sup>2</sup>
Emisividad onda larga cielo			0,95
Temperatura cielo cénit	Tzen	°C	-20 °C
Factor de gradiente de temperatura de cielo entre cénit y horizonte			0,67
Emisividad onda corta entorno			0,95
Calor específico aire		J/kgK	1012 J/kgK
		Wh/kgK	0,281 Wh/kgK
U del paramento	U34	W/m <sup>2</sup> K	0,97 W/m <sup>2</sup> K
<b>Per calcular U parament</b>			
espesor 1	e1	mm	20 mm
conductivitat 1	λ1	W/mK	0,04 W/mK
espesor 2	e2	mm	140 mm
conductivitat 2	λ2	W/mK	0,35 W/mK
espesor 3	e3	mm	0 mm
conductivitat 3	λ3	W/mK	1 W/mK
espesor 4	e4	mm	0 mm
conductivitat 4	λ4	W/mK	1 W/mK
espesor 5	e5	mm	0 mm
conductivitat 5	λ5	W/mK	1 W/mK
Resist. Superficial	Rsi	W/K	0,13 W/K

Figura 56: Esquema de la pestaña “k”. Fuente: elaboración propia

### 6.5.3. Pestaña “Pn”

En cada una de la pestañas “Pn” se calculan parámetros de una placa distinta. Puesto que se tomó la decisión de estudiar una altura de fachada de 30 placas, en este archivo hay 30 pestañas “Pn”, desde la “P1” hasta la “P30”.

La pestaña está estructurada en tres columnas: M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub>, y cinco filas: resultados, onda corta, onda larga, conducción y convección.

resultados	M1	M2	M3
onda corta			
onda larga			
conducción			
convección			

Figura 57: Esquema de la pestaña “Pn”. Fuente: elaboración propia

Esta pestaña no necesita ningún valor de entrada, pues todos ellos están referenciados desde la pestaña “Intro” o la pestaña “k”. De todas formas, considero que es importante que sea una pestaña clara para poder analizar cada una de las placas. Por este motivo hay dos formas de visualización. En la primera forma de visualización se muestran todos los valores que se han tenido en cuenta en el cálculo.



M1			M2			M3		
308 0,0 W/m <sup>2</sup>			48 0,0 W/m <sup>2</sup>			23 0,0 W/m <sup>2</sup>		
Temperatura M1	T1	35,8 °C	Temperatura M2	T2	35,4 °C	Temperatura M3	T3	33,4 °C
	Tk1	309,0 K		Tk2	308,5 K		Tk3	306,6 K
	T1-T2	0,44 °C					T2-T3	1,95 °C
<b>onda corta absorbida M1</b>								
100% 154 W/m <sup>2</sup>								
Radiación solar sobre plano de fachada:								
Absortividad onda corta M1	a1	0,4						
Radiación solar directa	Id	350,0 W/m <sup>2</sup>						
Reflejada por el entorno	Ie	17,5 W/m <sup>2</sup>						
Radiación difusa	Ia	17,5 W/m <sup>2</sup>						
<b>total onda larga M1</b>			<b>total onda larga M2</b>			<b>total onda larga M3</b>		
-63% -97,4 W/m <sup>2</sup>			-49% -11,6 W/m <sup>2</sup>			100% 11,6 W/m <sup>2</sup>		
onda larga absorbida M1	256%	393,5 W/m <sup>2</sup>	onda larga absorbida M2	1987%	476,5 W/m <sup>2</sup>	onda larga absorbida M3	4190%	487,6 W/m <sup>2</sup>
del cielo		132,8 W/m <sup>2</sup>	directa de M3		452,1 W/m <sup>2</sup>	directa de M2		463,7 W/m <sup>2</sup>
del entorno		260,7 W/m <sup>2</sup>	1a reflexió d'emissió M2		23,2 W/m <sup>2</sup>	1a reflexió d'emissió M3		22,6 W/m <sup>2</sup>
			2a reflexió d'emissió M3		1,1 W/m <sup>2</sup>	2a reflexió d'emissió M2		1,2 W/m <sup>2</sup>
			3a reflexió d'emissió M2		0,1 W/m <sup>2</sup>	3a reflexió d'emissió M3		0,1 W/m <sup>2</sup>
			4a reflexió d'emissió M3		0,0 W/m <sup>2</sup>	4a reflexió d'emissió M2		0,0 W/m <sup>2</sup>
			5a reflexió d'emissió M2		0,0 W/m <sup>2</sup>	5a reflexió d'emissió M3		0,0 W/m <sup>2</sup>
			6a reflexió d'emissió M3		0,0 W/m <sup>2</sup>	6a reflexió d'emissió M2		0,0 W/m <sup>2</sup>
			7a reflexió d'emissió M2		0,0 W/m <sup>2</sup>	7a reflexió d'emissió M3		0,0 W/m <sup>2</sup>
			8a reflexió d'emissió M3		0,0 W/m <sup>2</sup>	8a reflexió d'emissió M2		0,0 W/m <sup>2</sup>
			9a reflexió d'emissió M2		0,0 W/m <sup>2</sup>	9a reflexió d'emissió M3		0,0 W/m <sup>2</sup>
<b>ona larga emitida M1</b>			<b>ona larga emitida M2</b>			<b>ona larga emitida M3</b>		
-319% -490,9 W/m <sup>2</sup>			-2036% -488,2 W/m <sup>2</sup>			-4090% -475,9 W/m <sup>2</sup>		
Absortividad onda larga M1	E1	0,95	Absortividad onda larga M2	E2	0,95	Absortividad onda larga M3	E3	0,95
Emisividad onda larga cielo	0	0,95						
Temperatura cielo cénit	Tzen	-20 °C						
	Tkzen	253,15 K						
Factor de vista de cielo		0,4						
	Tksky	283,82						
Temperatura entorno 1	T ent 1	26 °C						
		299,15 K						
Factor de vista de entorno 1	F ent 1	0,5						
Temperatura entorno 2	T ent 2	50 °C						
		323,15 K						
Factor de vista de entorno 2	F ent 2	0,1						
<b>conducción M1 a M2</b>			<b>conducción M2 a M1</b>			<b>conducción M3 a M4</b>		
-16% -24,0 W/m <sup>2</sup>			100% 24,0 W/m <sup>2</sup>			-79% -9,2 W/m <sup>2</sup>		
Espesor placa	ep	0,04 m						
Conductividad térmica placa	λp	2,2 W/mK						
<b>convección M1</b>			<b>convección M2</b>			<b>convección M3</b>		
-21% -32,6 W/m <sup>2</sup>			-51% -12,3 W/m <sup>2</sup>			-21% -2,5 W/m <sup>2</sup>		
Coef. de convección M1	h1	3,32 W/m <sup>2</sup> K	Coef. de convección M2	h2	4,86 W/m <sup>2</sup> K	Coef. de convección M3	h3	4,18 W/m <sup>2</sup> K
Temperatura media aire exterior	Te medi	26 °C	Temp. Media del aire de la cámara	Ti medi	32,85 °C	Dif T3-Ti media		0,59 °C
Velocidad media del aire exterior	Ve medi	0 m/s	Densidad media aire interior	ρ int	1,14 kg/m <sup>3</sup>			
		0 km/h	Espesor cámara	ec	0,06 m			
			Volumen aire 1m <sup>2</sup> fachada		0,06 m <sup>3</sup>			
			Velocitat mitja darrere placa	Vi (h4/8)	1,27 m/s			
			Altura placa	hp	0,6 m			
			Tiempo que tarda aire en recorrer la placa		0 s			
			Renovaciones completas por hora del aire		4575,6945 rh			
			Masa térmica aire cámara	Mt	6923,3747 W/m <sup>2</sup> K			
			número de divisiones de según corba		100			
			Ti (h8/8)		32,9020 °C			
			Dif T2-Ti (h8/8)		2,48886 °C			
			Dif T2-Ti (h7/8)		2,50115 °C			
			Dif T2-Ti (h6/8)		2,51353 °C			
			Dif T2-Ti (h5/8)		2,52602 °C			
			Dif T2-Ti (h4/8)		2,53860 °C			
			Dif T2-Ti (h3/8)		2,55128 °C			
			Dif T2-Ti (h2/8)		2,56405 °C			
			Dif T2-Ti (h1/8)		2,57693 °C			
			Dif T2-Ti (h0/8)		2,58990 °C			
			Ti (h0/8)		32,8009 °C			
			Dif T2-Ti media		2,53892 °C			
			Dif Ti (h8/8) - Ti (h0/8)		0,10105 °C			

Figura 58: Versión desplegada de la pestaña "Pn". Fuente: elaboración propia

En la segunda forma de visualización, usada para el análisis de resultados, se contraen todos los detalles de cada una de las filas y se expande una fila con la gráfica comparadora de barras. De esta forma puede verse claramente el valor final de cada uno de los flujos energéticos.

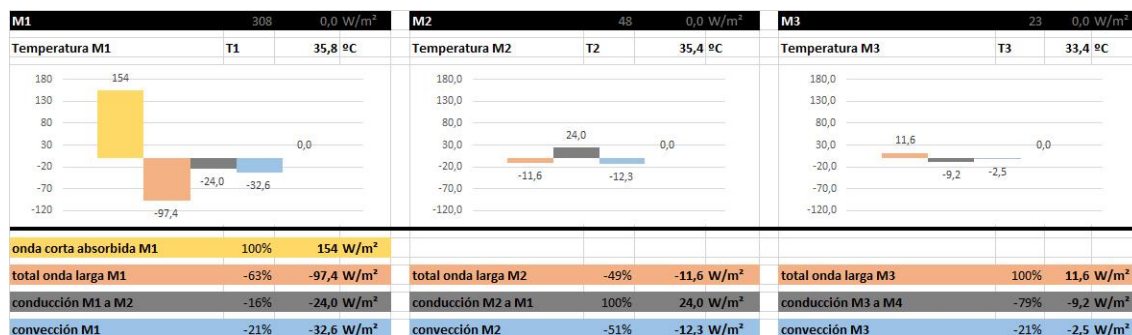


Figura 59: Versión de visualización de resultados de la pestaña “Pn”. Fuente: elaboración propia

#### 6.5.4. Pestaña “it-Pn”

Esta pestaña también está repetida 30 veces, desde “it-P1” hasta “it-P30”. Se trata de una pestaña auxiliar a su correspondiente “Pn”, donde tampoco es necesario introducir ningún valor. En ella se hacen las diversas iteraciones necesarias para conseguir el resultado final que se muestra en “Pn”. Este es otro de los cálculos recurrentes que había que resolver, puesto que los flujos dependen de las temperaturas pero éstos a su vez las modifican si la fachada no está en equilibrio.

Se ha resuelto haciendo un cálculo distinto en cada columna, vinculado al de la columna anterior. De esta manera en cada columna el resultado se acerca más al resultado final, hasta llegar a un resultado con un margen de error suficientemente pequeño.



Figura 60: Esquema de la pestaña “it-Pn”. Fuente: elaboración propia

En la franja de la izquierda se listan los parámetros que varían según el cambio de temperaturas o de flujos. En la primera columna de la franja derecha se parte de una temperatura  $T_2$  y de unas diferencias  $T_1-T_2$  y  $T_2-T_3$ . Si con estas temperaturas la fachada no se encuentra en situación de equilibrio, en la segunda columna se modifican ligeramente estas temperaturas y se repite el proceso. Después de más de 600 columnas se llega a un resultado con un margen de error muy pequeño, que dependerá de los parámetros introducidos. Ninguno los cálculos que se han realizado para ejemplificar este estudio ha superado el margen de error de una diezmilésima parte de grado, lo que a efectos prácticos es despreciable en este estudio.





			-150,0487	-341,2764	-294,8552	-248,1922	-210,6653	-180,4818	-155,8500	-135,4755	-118,4275	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Tk1	K		324,1500	322,4739	320,1851	318,4084	317,0400	315,9643	315,1002	314,3924	313,8023	768	308,9768	308,9768	308,9768	308,9768
T1	°C		51,0000	49,3239	47,0351	45,2584	43,8900	42,8143	41,9502	41,2424	40,6523	268	35,8268	35,8268	35,8268	35,8268
200 T1-T2	K		1,0000	0,0742	-0,5082	-0,8107	-0,9381	-0,9605	-0,9222	-0,8508	-0,7635	360	0,4360	0,4360	0,4360	0,4360
Tk2	K		323,1500	322,3998	320,6934	319,2191	317,9781	316,9248	316,0224	315,2432	314,5658	408	308,5408	308,5408	308,5408	308,5408
200 T2	°C		50,0000	49,2498	47,5434	46,0691	44,8281	43,7748	42,8724	42,0932	41,4158	908	35,3908	35,3908	35,3908	35,3908
200 T2-T3	K		1,0000	1,0649	1,6396	2,1237	2,5093	2,8148	3,0556	3,2440	3,3897	489	1,9489	1,9489	1,9489	1,9489
Tk3	K		322,1500	321,3348	319,0538	317,0954	315,4688	314,1100	312,9668	311,9991	311,1761	920	306,5920	306,5920	306,5920	306,5920
T3	°C		49,0000	48,1848	45,9038	43,9454	42,3188	40,9600	39,8168	38,8491	38,0261	420	33,4420	33,4420	33,4420	33,4420
M1			-185,1684	-116,4777	-60,4860	-25,4922	-4,4820	7,6706	14,2783	17,4573	18,5555	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ona llarga emesa	W/m²		-594,6902	-582,4854	-566,1238	-553,6623	-544,2056	-536,8570	-531,0085	-526,2531	-522,3132	193	-490,9193	-490,9193	-490,9193	-490,9193
total ona llarga	W/m²		-201,1684	-188,9636	-172,6020	-160,1405	-150,6838	-143,3352	-137,4868	-132,7313	-128,7914	975	-97,3975	-97,3975	-97,3975	-97,3975
conducció amb M2	W/m²		-55,0000	-4,0787	27,9527	44,5863	51,5967	52,8292	50,7198	46,7933	41,9925	775	-23,9775	-23,9775	-23,9775	-23,9775
convecció	W/m²		-83,0000	-77,4354	-69,8367	-63,9380	-59,3949	-55,8234	-52,9547	-50,6047	-48,6456	250	-32,6250	-32,6250	-32,6250	-32,6250
M2	W/m²		48,1076	-109,8719	-137,5402	-145,5746	-145,0994	-139,9882	-132,4413	-123,7978	-114,8631	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ona llarga absorbida	W/m²		580,4932	574,6630	558,7153	545,2875	534,3154	525,2725	517,7482	511,4379	506,1118	191	476,5191	476,5191	476,5191	476,5191
directa de M3	W/m²		551,1411	545,5837	530,2565	517,3565	506,8225	498,1471	490,9344	484,8906	479,7943	404	452,1404	452,1404	452,1404	452,1404
1a reflexió d'emissió M2	W/m²		27,9008	27,6426	27,0620	26,5678	26,1571	25,8122	25,5195	25,2687	25,0522	873	23,1873	23,1873	23,1873	23,1873
2a reflexió d'emissió M3	W/m²		1,3779	1,3640	1,3256	1,2934	1,2671	1,2454	1,2273	1,2122	1,1995	304	1,1304	1,1304	1,1304	1,1304
3a reflexió d'emissió M2	W/m²		0,0698	0,0691	0,0677	0,0664	0,0654	0,0645	0,0638	0,0632	0,0626	580	0,0580	0,0580	0,0580	0,0580
4a reflexió d'emissió M3	W/m²		0,0034	0,0034	0,0033	0,0032	0,0032	0,0031	0,0031	0,0030	0,0030	028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028
5a reflexió d'emissió M2	W/m²		0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
6a reflexió d'emissió M3	W/m²		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7a reflexió d'emissió M2	W/m²		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8a reflexió d'emissió M3	W/m²		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9a reflexió d'emissió M2	W/m²		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ona llarga emesa	W/m²		-587,3856	-581,9497	-569,7268	-559,3223	-550,6754	-543,4150	-537,2521	-531,9727	-527,4151	545	-488,1545	-488,1545	-488,1545	-488,1545
total ona llarga	W/m²		-6,8924	-7,2868	-11,0115	-14,0347	-16,3601	-18,1425	-19,5039	-20,5347	-21,3033	354	-11,6354	-11,6354	-11,6354	-11,6354
conducció amb M1	W/m²		55,0000	4,0787	-27,9527	-44,5863	-51,5967	-52,8292	-50,7198	-46,7933	-41,9925	775	23,9775	23,9775	23,9775	23,9775
convecció	W/m²		0,0000	-106,6638	-98,5760	-86,9535	-77,1427	-69,0164	-62,2176	-56,4698	-51,5673	420	-12,3420	-12,3420	-12,3420	-12,3420
coef convecció h2	W/m²K		3,1020	6,3964	6,3232	6,2100	6,1053	6,0110	5,9256	5,8479	5,7769	611	4,8611	4,8611	4,8611	4,8611
diferència T2-T1 mitja	K			16,6757	15,5895	14,0022	12,6353	11,4817	10,4998	9,6564	8,9265	389	2,5389	2,5389	2,5389	2,5389
Ti mitja (h4/8)	°C		50,0000	32,5741	31,9539	32,0669	32,1929	32,2932	32,3726	32,4367	32,4893	519	32,8519	32,8519	32,8519	32,8519
Densitat mitja aire càmera	kg/m³		1,079681	1,141194	1,143383	1,142985	1,14254	1,142186	1,141905	1,141679	1,141493	213	1,140213	1,140213	1,140213	1,140213
Inercia tèrmica considerand	Wh/K		6555,82	6929,33	6942,624	6940,202	6937,501	6935,351	6933,648	6932,274	6931,147	375	6923,375	6923,375	6923,375	6923,375
Ti (h8/8)	°C		50,0000	32,9238	32,4172	32,4653	32,5381	32,5945	32,6375	32,6711	32,6980	020	32,9020	32,9020	32,9020	32,9020
Diff T2-Ti (h8/8)	°C			16,3259	15,1261	13,6038	12,2900	11,1803	10,2349	9,4220	8,7178	889	2,4889	2,4889	2,4889	2,4889
Diff T2-Ti (h7/8)	°C			16,4325	15,2853	13,7409	12,4079	11,2824	10,3240	9,5004	8,7872	011	2,5011	2,5011	2,5011	2,5011
Diff T2-Ti (h6/8)	°C			16,5398	15,4461	13,8794	12,5270	11,3856	10,4141	9,5796	8,8572	135	2,5135	2,5135	2,5135	2,5135
Diff T2-Ti (h5/8)	°C			16,6478	15,6087	14,0195	12,6473	11,4898	10,5051	9,6596	8,9280	260	2,5260	2,5260	2,5260	2,5260
Diff T2-Ti (h4/8)	°C			16,7566	15,7731	14,1610	12,7689	11,5951	10,5970	9,7404	8,9994	386	2,5386	2,5386	2,5386	2,5386
Diff T2-Ti (h3/8)	°C			16,8661	15,9393	14,3040	12,8918	11,7015	10,6898	9,8219	9,0716	513	2,5513	2,5513	2,5513	2,5513
Diff T2-Ti (h2/8)	°C			16,9763	16,1073	14,4486	13,0159	11,8089	10,7835	9,9043	9,1444	641	2,5641	2,5641	2,5641	2,5641
Diff T2-Ti (h1/8)	°C			17,0873	16,2771	14,5947	13,1414	11,9175	10,8782	9,9875	9,2180	769	2,5769	2,5769	2,5769	2,5769
Diff T2-Ti (h0/8)	°C		17,19906	16,44881	14,74243	13,26816	12,02720	10,97387	10,07146	9,29221	8,61483	990	2,58990	2,58990	2,58990	2,58990
Ti (h0/8)	°C		32,8009	32,8009	32,8009	32,8009	32,8009	32,8009	32,8009	32,8009	32,8009	009	32,8009	32,8009	32,8009	32,8009
Diff Ti (h8/8) - Ti (h0/8)	°C		17,19906	0,12289	-0,38371	-0,33568	-0,26283	-0,20641	-0,16340	-0,12982	-0,10293	105	0,10105	0,10105	0,10105	0,10105
velocitat mitja aire interior	m/s		1,2710	1,2710	1,2710	1,2710	1,2710	1,2710	1,2710	1,2710	1,2710	710	1,2710	1,2710	1,2710	1,2710
M3	W/m²		-12,9879	-114,9268	-96,8290	-77,1254	-61,0839	-48,1642	-37,6870	-29,1350	-22,1200	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ona llarga absorbida	W/m²		587,0410	581,5854	569,1762	558,6206	549,8574	542,5079	536,2769	530,9459	526,3499	727	487,5727	487,5727	487,5727	487,5727
directa de M2	W/m²		558,0163	552,8523	541,2404	531,3562	523,1417	516,2443	510,3895	505,3740	501,0443	468	463,7468	463,7468	463,7468	463,7468
1a reflexió d'emissió M3	W/m²		27,5571	27,2792	26,5128	25,8678	25,3411	24,9074	24,5467	24,2445	23,9897	070	22,6070	22,6070	22,6070	22,6070
2a reflexió d'emissió M2	W/m²		1,3950	1,3821	1,3531	1,3284	1,3079	1,2906	1,2760	1,2634	1,2526	594	1,1594	1,1594	1,1594	1,1594
3a reflexió d'emissió M3	W/m²		0,0689	0,0682	0,0663	0,0647	0,0634	0,0623	0,0614	0,0606	0,0600	565	0,0565	0,0565	0,0565	0,0565
4a reflexió d'emissió M2	W/m²		0,0035	0,0035	0,0034	0,0033	0,0033	0,0032	0,0032	0,0032	0,0031	029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029
5a reflexió d'emissió M3	W/m²		0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
6a reflexió d'emissió M2	W/m²		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7a reflexió d'emissió M3	W/m²		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8a reflexió d'emissió M2	W/m²		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9a reflexió d'emissió M3	W/m²		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ona llarga emesa	W/m²		-580,1485	-574,2987	-558,1647	-544,5858	-533,4974	-524,3653	-516,7730	-510,4112	-505,0466	373	-475,9373	-475,9373	-475,9373	-475,9373
total ona llarga	W/m²		6,8924	7,2868	11,0115	14,0347	16,3601	18,1425	19,5039	20,5347	21,3033	354	11,6354	11,6354	11,6354	11,6354
conducció amb M4	W/m²		-24,2718	-23,4804	-21,2658	-19,3644	-17,7852	-16,4661	-15,3561	-14,4166	-13,6176	670	-9,1670	-9,1670	-9,1670	-9,1670
convecció	W/m²		4,3915	-98,7332	-86,5746	-71,7957	-59,6588	-49,8407	-41,8348	-35,2531	-29,8057	685	-2,4685	-2,4		

resultados y las conclusiones derivadas de ellos. Aun así, sí que se ha ido comparando durante todo el proceso con algunas mediciones realizadas en la Illa Diagonal, así como también con valores enunciados por diversos estudios.

El resto de limitaciones se pueden clasificar en tres grupos en función de su naturaleza:

- Renuncias iniciales en el planteamiento del algoritmo
- Interferencias del canal no consideradas
- Influencia de una realidad constructiva incontrolable

En el primer punto, las renuncias iniciales en el planteamiento del algoritmo, son aquellas limitaciones con las que partía la herramienta, ya sea por analizar el sistema constructivo sin tener en cuenta la forma del edificio o por no considerar el paso del tiempo.

- No tiene en cuenta las **irregularidades de la fachada** como giros o esquinas, ni la **disposición de huecos** como ventanas, sectorizaciones de incendio, etc.
- No considera el **flujo inducido por diferentes presiones de viento** sobre la fachada
- Considera una **situación estacionaria**, por lo que no tiene en cuenta la **inercia térmica** de los materiales

El segundo punto es relativo a las interferencias del canal no consideradas en la herramienta por simplificaciones geométricas, pero que se podrán implementar en una versión próxima del algoritmo.

- No considera las **juntas verticales** abiertas
- Considera una cámara homogénea sin **travesaños**
- No permite la introducción de **juntas laberínticas**

Y finalmente, las limitaciones relativas a la influencia de una realidad constructiva incontrolable, donde un sinfín de imprevistos e imprecisiones pueden modificar notablemente los flujos.

- Aislamiento mal colocado o descolgado
- Obstrucciones por suciedad
- Etc.

## 7. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Una vez desarrollada esta herramienta de cálculo podremos usarla para ver qué parámetros tienen influencia en el funcionamiento energético de la fachada ventilada, y en qué grado.

### 7.1. Fachada base y parámetros climáticos

Para hacer las comprobaciones partiremos de una fachada base, a la que se irá cambiando solamente un parámetro cada vez, para ver así cómo afecta este parámetro. La situación base es la que se ha usado en el apartado anterior para explicar el funcionamiento de la herramienta, y tiene las siguientes características constructivas. La llamaré OJVF-c60-j7, por ser una OJVF de 60mm de cámara de aire y 7mm de junta.

Absortividad onda corta $M_1$		0,4
Absortividad onda larga $M_1$		0,95
Absortividad onda larga $M_2$		0,95
Absortividad onda larga $M_3$		0,95
Altura placa	m	0,6
Ancho de junta	m	0,007
Conductividad térmica placa	W/mK	2,2
Espesor placa	m	0,04
Espesor cámara	m	0,06
Transmitancia térmica de la hoja interior, considerada desde $M_3$ hasta el aire interior.	W/m <sup>2</sup> K	0,97
2cm de aislante $\lambda=0,04$		
14cm ladrillo perforado $\lambda=0,35$		
Resistencia superficial interior $R=0,13$		
$1/(0,02/0,04+0,14/0,35+0,13)$		

Con los siguientes parámetros de entorno:

Factor de vista de entorno 1	50%
Factor de vista de entorno 2	10%

La fracción restante del factor de vista del entorno es cielo, cuya temperatura se calcula como un gradiente entre la temperatura del zénit y la del entorno a la sombra. En este caso se han dejado fijos los siguientes parámetros, que se pueden cambiar en la hoja de cálculo para adaptarse al clima:

Temperatura del zénit	°C	-20
Gradiente entre zénit y entorno a la sombra		2/3

Esta fachada se someterá a dos situaciones climáticas opuestas: fachada soleada en verano, e invierno durante una noche despejada. Se han buscado estas dos situaciones para estudiar la fachada con flujo energético hacia ambos sentidos (ganancias y pérdidas). Según [7] son las dos situaciones extremas donde se pueden observar mejor las diferencias entre las fachadas con cámara no ventilada y las OJVF. Este mismo artículo apunta que la OJVF es mejor para condiciones de verano sobretodo en fachada soleada, mientras que en condiciones de invierno funciona mejor

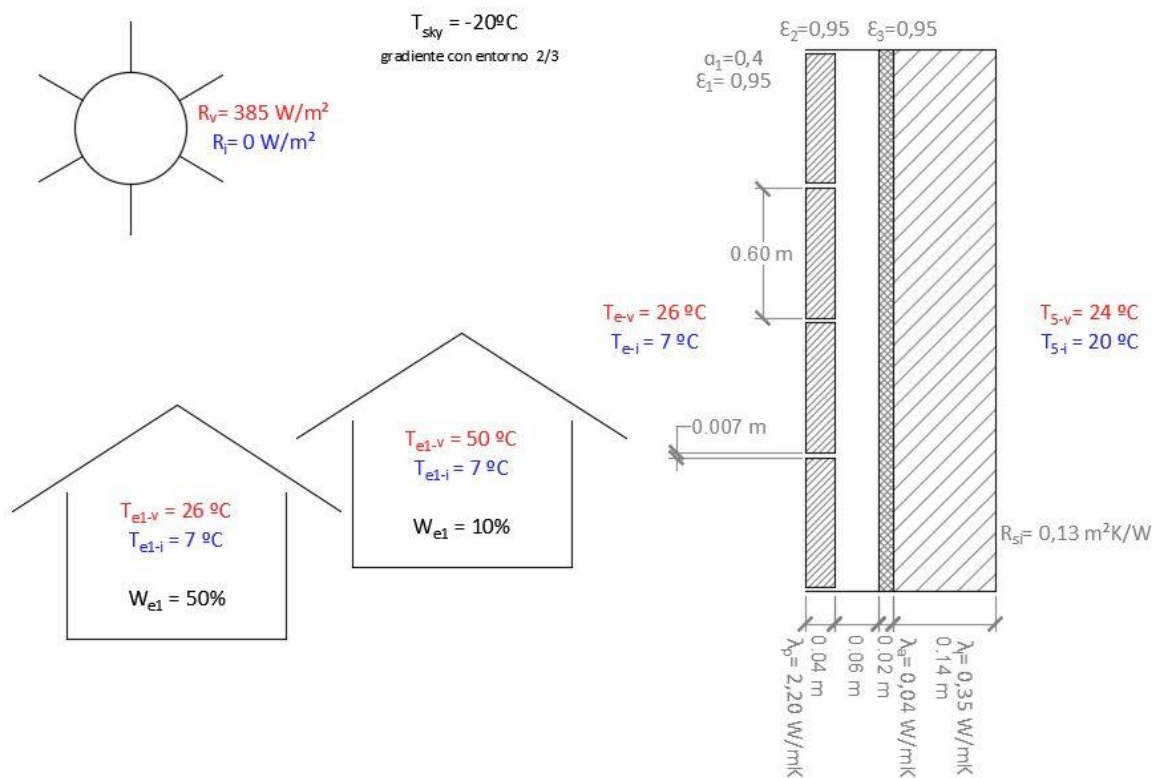


una cámara no ventilada. En todo caso acepta que se necesitará un estudio detallado para ver si en el global del año las ventajas superan los inconvenientes.

De todas formas hay que tener en cuenta que el funcionamiento energético de la fachada puede cambiar en función de los parámetros ambientales de cada situación, y no se podrán aplicar estos resultados a todas las situaciones de pérdidas o de ganancias energéticas. Los valores ambientales de la fachada soleada en verano se han tomado para una fachada 18º Sur en Barcelona a inicios de junio. Los valores de invierno noche son independientes de la orientación de la fachada, y se han tomado los datos de enero.

Los parámetros ambientales considerados son los siguientes:

	Fachada soleada en verano	Invierno por la noche
Irradiación solar total (directa + reflejada + difusa) [W/m²]	385	0
Temperatura entorno 1 [°C] – (50% de campo visual)	26	7
Temperatura entorno 2 [°C] – (10% de campo visual)	50	7
Temperatura del espacio interior climatizado [°C]	24	20
Temperatura media del aire exterior [°C]	26	7



**Figura 62:** Imagen resumen de los datos considerados para el ejemplo de aplicación. Fuente: elaboración propia

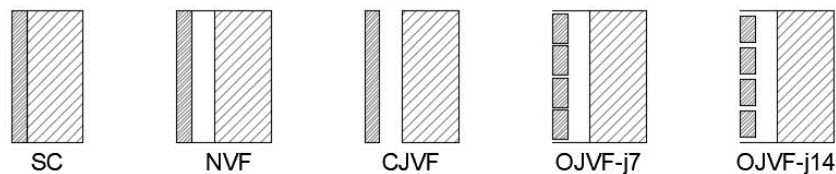
El análisis se realiza con la presencia de viento sobre la fachada y sin él. En los que sí se considera, se ha dado un valor de viento uniforme de 0,6m/s en toda la superficie de la fachada.

## 7.2. Espesor de cámara y tipologías de fachada

Partiendo de la fachada base anterior, se van a estudiar diversas modificaciones. En este apartado se va a estudiar la influencia del espesor de cámara y el tipo de ventilación. Por este motivo se van a modificar los parámetros de espesor de cámara y espesor de junta para analizar las siguientes cuatro tipologías.

- SC Fachada sin cámara
- NVF Con cámara de aire no ventilada
- CJVF Con cámara de aire ventilada de junta cerrada
- OJVF Con cámara de aire ventilada de junta abierta
  - OJVF-j7 Juntas de 7mm
  - OJVF-j14 Juntas de 14mm

La tipología de junta abierta se subdivide en dos casos distintos, con junta de 7mm y junta de 14mm. En el caso de la fachada sin cámara se considera que la placa exterior está en contacto directo con la hoja interior, y  $M_2$  y  $M_3$  coinciden.



**Figura 63:** Esquemas de las fachadas simuladas. Fuente: elaboración propia

## 7.3. Análisis de resultados 1

En el eje Y de las gráficas se representa el flujo energético que atraviesa la hoja interior del cerramiento. En signo positivo se han graficado las ganancias y en negativo las pérdidas. De este modo en las situaciones calculadas de verano los resultados se mueven en el lado de los positivos y en las de invierno en el lado de los negativos. En ambos casos será deseable que el flujo tenga el menor valor absoluto posible, es decir, que sea lo más próximo posible a 0.

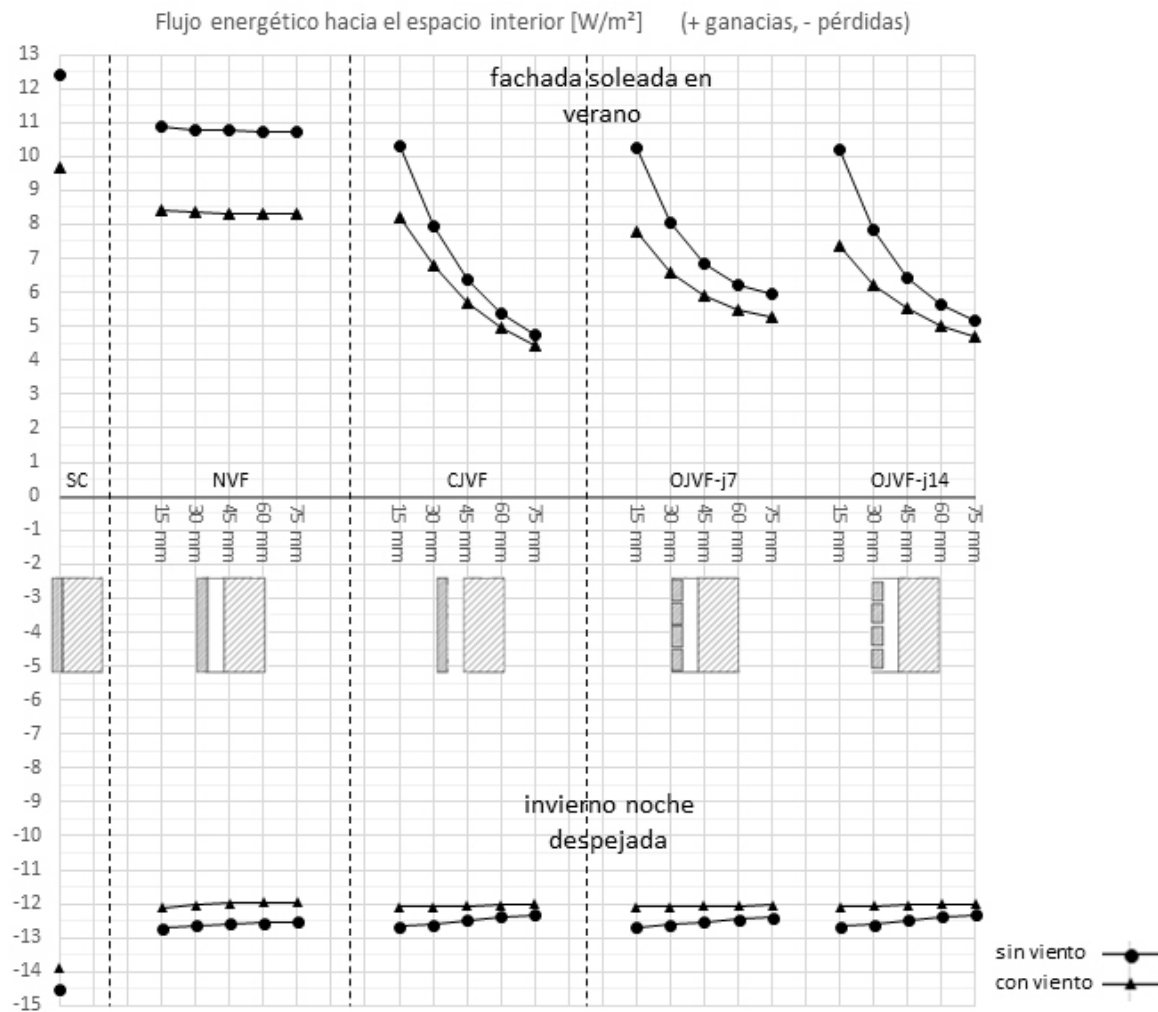


Figura 64: Afectación de la variación del espesor de cámara sobre el flujo energético en cinco tipologías de fachada.

Fuente: elaboración propia

A primera vista podemos observar que tanto en la situación de verano como en la de invierno, la fachada que tiene un mayor flujo es la fachada sin cámara.

En verano, podemos observar que la NVF depende muy poco del espesor de cámara y tiene un flujo aproximadamente un 13% menor que la fachada sin cámara. En cambio, todas las fachadas ventiladas sí que dependen en gran medida del espesor de la cámara. Mientras que una VF con un espesor de cámara de 15mm tiene un flujo energético prácticamente igual que una NVF, las que tienen un espesor de 60mm pueden tener un flujo 50% menor que las NVF (según los parámetros y rangos estudiados).

Si comparamos los diferentes tipos de VF entre ellos, vemos que para un mismo espesor de cámara de 60mm, la que funciona mejor es la CJVF con un flujo 40%-50% menor que las NVF, seguida de la OJVF-j14 40%-48%, y finalmente OJVF-j7 34%-42%. De todas formas estos valores no pueden ser extrapolables a otras situaciones sin un estudio más detallado.

En invierno, todas las fachadas con cámara estudiadas, ya sea ventilada o no ventilada, funcionan prácticamente igual, independientemente del espesor de cámara. Tienen un flujo alrededor del 13% menor que la fachada sin cámara. Esto es debido a que las diferencias de temperatura entre

el aire de la cámara y el aire del exterior son mucho menores que en verano, con lo cual consiguen flujos de ventilación más bajos.

Este razonamiento nos sirve para comprobar que el espesor de la cámara, en verano, es un parámetro muy importante a tener en cuenta, pues puede hacer que una supuesta cámara ventilada no consiga ventilar suficiente para disipar el calor.

La misma gráfica nos sirve para ver la influencia del viento en cada una de las fachadas. En verano la influencia del viento hace que el flujo disminuya un 22% en las fachadas sin cámara, y entre el 27% y el 7% en las VF.

#### 7.4. Otros parámetros

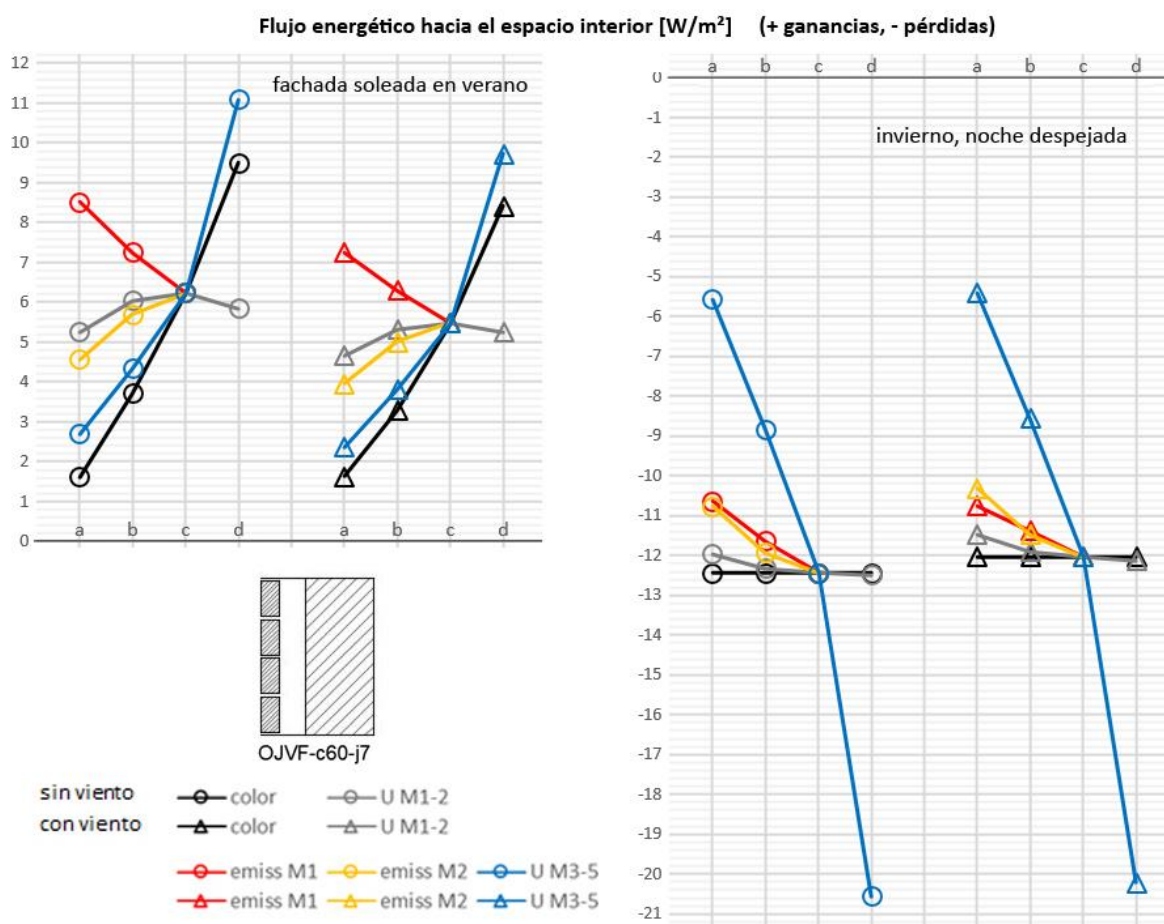
La herramienta también se puede usar para analizar en detalle cada uno de los tipos de fachada anterior, y variar otro tipo de parámetros, listados abajo. En todos los casos la situación base se corresponde al valor C, de manera que los valores A y B son de valor inferior a C, y el valor D es superior. Se han definido los valores A y D como límites inferior y superior (respectivamente) de cada parámetro, pero siempre teniendo en cuenta que fueran límites asumibles desde una realidad constructiva. De todas formas, puede haber situaciones extremas que salgan de estos límites. Por ejemplo, la absorptividad a onda corta es un parámetro que físicamente tiene un rango de 0 a 1, pero me ha parecido razonable tomar los valores límite como 0,1 (aluminio pulido) y 0,8 (piedra oscura). Los valores B y C en todos los casos son valores intermedios.

- **1 Color de M<sub>1</sub>.** Se introduce con el parámetro adimensional de la absorptividad a la onda corta. Tiene una relación directa con la absorción de radiación solar.
  - o A: 0,1 aluminio pulido
  - o B: 0,2
  - o **C: 0,4**
  - o D: 0,8 piedra oscura
- **2 Grosor y conductividad térmica de la placa.** Afecta directamente a la diferencia de temperatura T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub>, por lo que tiene una cierta influencia en el flujo de entrada y la disipación por convección en M<sub>1</sub>. Se han escogido 4 soluciones constructivas diferentes, pensando en que tuviesen una transmitancia térmica (U<sub>1-2</sub>) muy distinta.
  - o A: U<sub>1-2</sub> = 10,7 W/m<sup>2</sup>K 15mm de madera λ=0,16 W/mK
  - o B: U<sub>1-2</sub> = 27,5 W/m<sup>2</sup>K 40mm de piedra λ=1,1 W/mK
  - o **C: U<sub>1-2</sub> = 55 W/m<sup>2</sup>K 40mm de piedra λ=2,2 W/mK**
  - o D: U<sub>1-2</sub> = 950 W/m<sup>2</sup>K 6mm composite Al. λ=5,7 W/mK
- **3 Emisividad ε<sub>1</sub>.** Afecta a la capacidad de emitir y absorber infrarrojos, por lo que tiene una gran importancia en el intercambio energético de M<sub>1</sub> con el entorno.
  - o A: 0,15
  - o B: 0,55
  - o **C: 0,95**
  - o ~~D: (no es posible)~~
- **4 Emisividad ε<sub>2</sub>.** Afecta a la capacidad de emitir y absorber infrarrojos, por lo que tiene una gran importancia en el intercambio energético entre las dos capas límite de la cámara: M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub>.
  - o A: 0,15
  - o B: 0,55
  - o **C: 0,95**
  - o ~~D: (no es posible)~~

- **5 Grosor de aislamiento en M<sub>3</sub>.** Afecta directamente a la transmitancia térmica ( $U_{3-5}$ ) de la hoja interior, y por lo tanto al flujo energético por conducción entre M<sub>3</sub> y M<sub>4</sub>. Se han escogido 3 grosores que podrían ser habituales y una situación sin aislamiento. En este caso el límite inferior “A” podría ser más discutible, pues siempre se puede añadir más aislamiento, pero me ha parecido que 8cm podría ser un límite de los casos habituales construidos actualmente, suficientemente distanciado del resto para ver la tendencia de la afectación de este parámetro.
  - A: 80mm
  - B: 40mm
  - C: 20mm
  - D: sin aislamiento en M3

## 7.5. Análisis de resultados 2

En primer lugar se va a detallar la fachada base OJVF-c60-j7, con viento y sin viento, tanto en verano como en invierno. Cada una de las combinaciones de datos supone un cálculo, cuyo resultado se ha plasmado con un punto en la gráfica. Uniendo diversos puntos que comparten un mismo parámetro se puede ver la tendencia de esta variación.



**Figura 65:** Afectación de las variaciones de diversos parámetros sobre el flujo energético en una OJVF-c60-j7. Fuente: elaboración propia

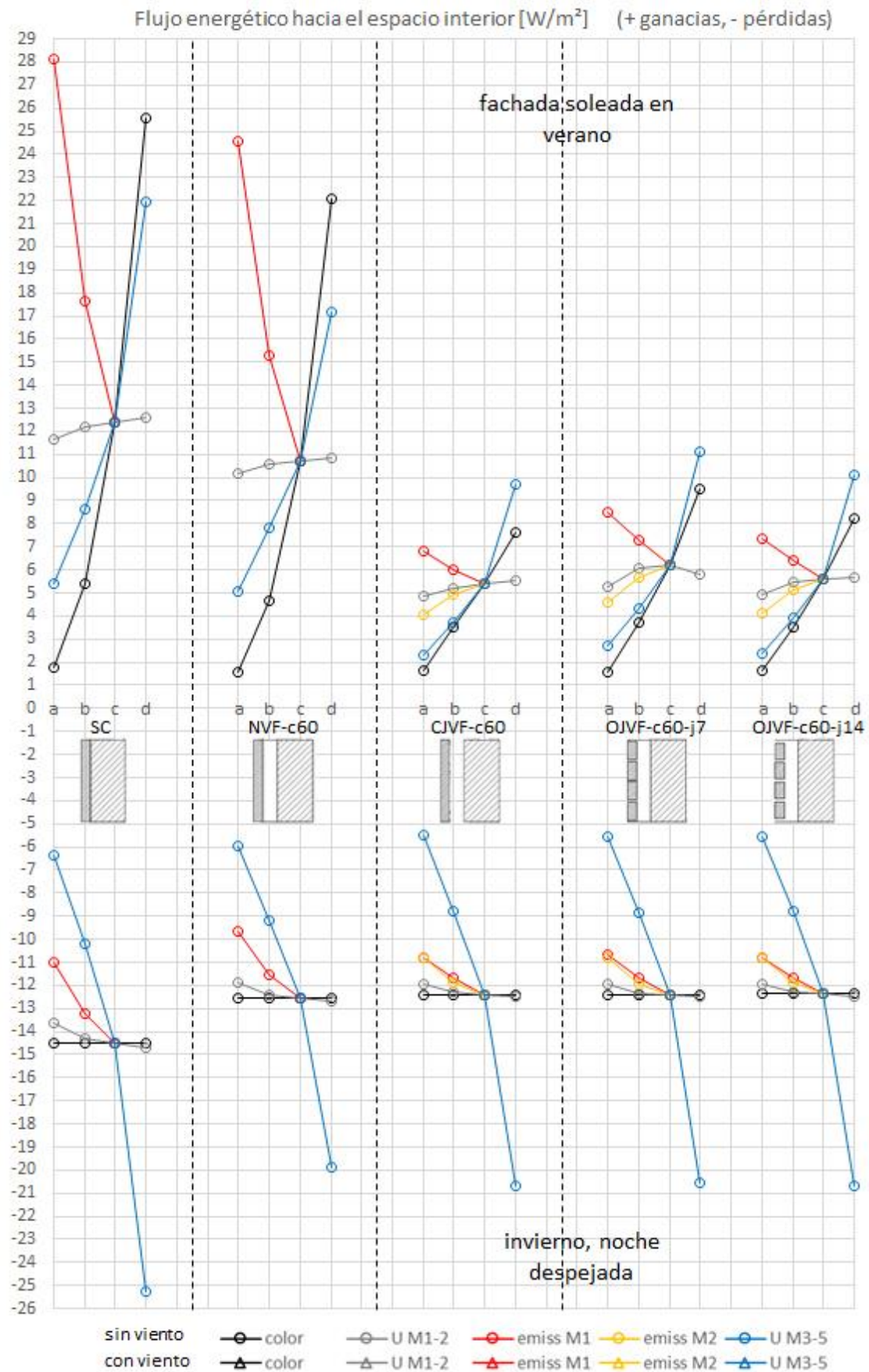
En esta gráfica podemos observar que en la situación estudiada de invierno lo que más afecta es el grosor de aislamiento que tenga la fachada. Teniendo en cuenta únicamente esta variación, el flujo en la situación más desfavorable es unas 3,7 veces mayor que en la situación más favorable.

En cambio, en la situación de verano hay mucha más variedad. Los dos parámetros que más afectan son el grosor de aislamiento y el color de  $M_1$ , seguidos de la emisividad  $\epsilon_1$ . En los dos primeros casos, el flujo en la situación más desfavorable es de 4 a 6 veces mayor que en la situación más favorable, mientras que en relación a  $\epsilon_1$ , solo aumenta alrededor del 35%.

La influencia del viento hace que en la mayoría de los casos el flujo con situación con viento sea un 13% inferior que la misma combinación de parámetros sin viento.

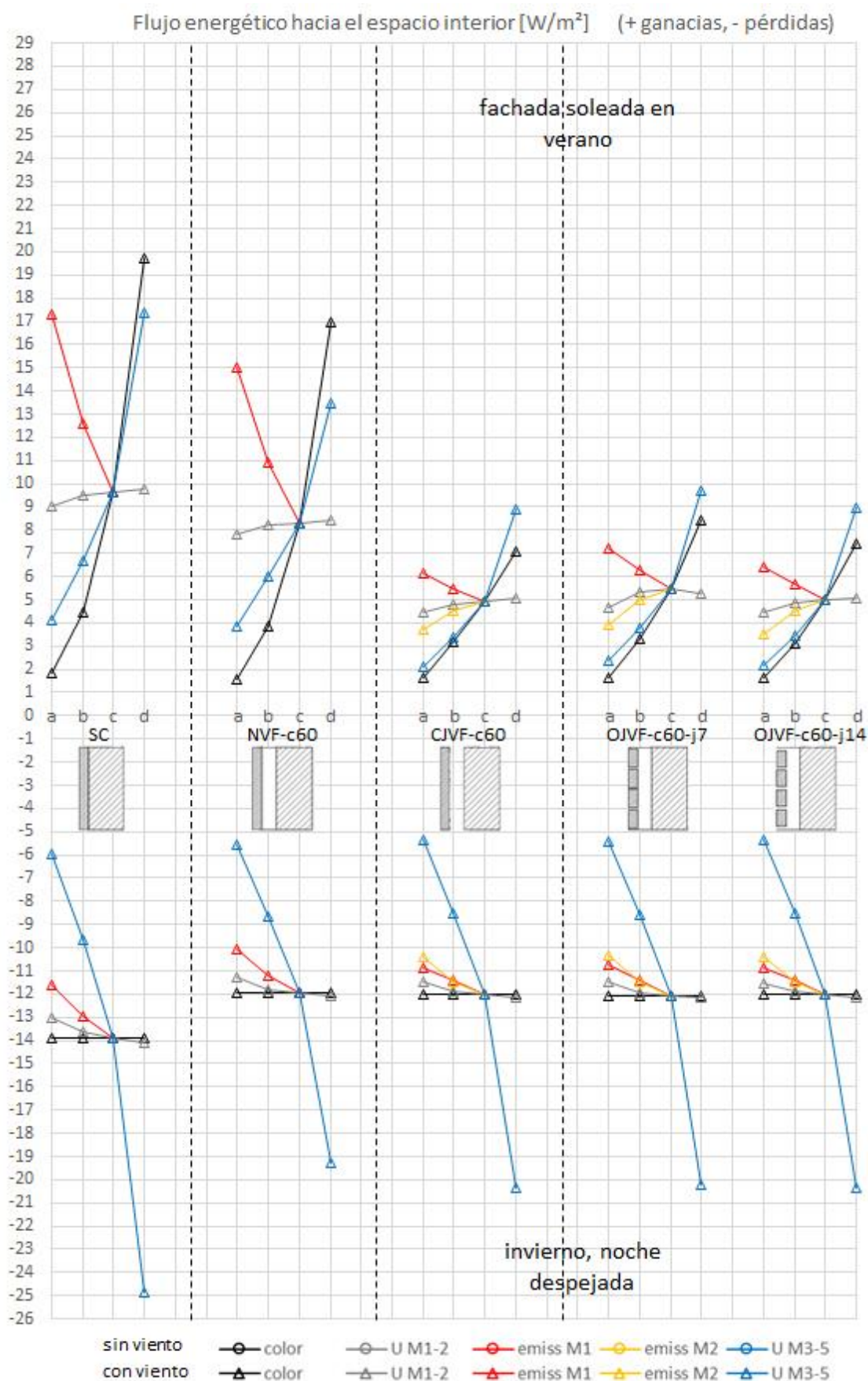
### **7.6. Análisis de resultados 3**

El mismo procedimiento se puede aplicar para todos los tipos de fachadas introducidas anteriormente:



**Figura 66:** Afectación de las variaciones de diversos parámetros sobre el flujo energético en cinco tipologías de fachada, sin viento. Fuente: elaboración propia





**Figura 67:** Afectación de las variaciones de diversos parámetros sobre el flujo energético de cinco tipologías de fachada, con viento. Fuente: elaboración propia

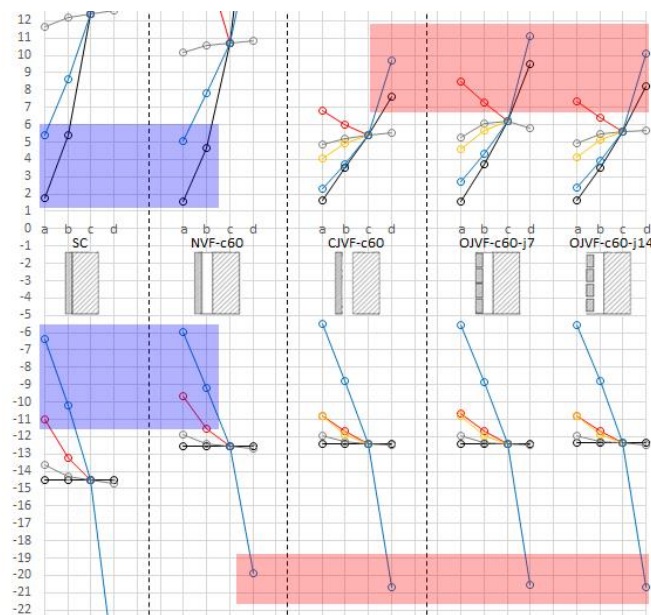


En las gráficas anteriores podemos observar que los parámetros analizados influyen en las VF estudiadas de una forma muy parecida, y que las mayores diferencias son con las fachadas sin cámara o con las NVF, en función de la época del año.

En invierno, en general funcionan de forma más parecida las fachadas con cámara (tanto VF como NVF) comparadas entre ellas que con las fachadas sin cámara. Sin embargo, sin aislamiento o con  $\epsilon_1$  baja es donde más diferencia se observa entre las VF y las NVF. Los flujos de las NVF y las VF son alrededor del 13% más bajos que en la fachada sin cámara.

En verano, la mayor diferencia se da entre las VF y el resto, con la misma proporción que en el primer análisis de resultados. Tanto en las NVF como en las fachadas sin cámara, el color de  $M_1$  y el grosor de aislamiento tienen una gran influencia. En tercer lugar encontramos  $\epsilon_1$ , con una variación entre la situación con viento y la sin viento mayor a la del resto de los parámetros.

Esta misma gráfica nos sirve para comprobar que aunque por regla general parece que la fachada ventilada funciona mejor que una fachada sin cámara o una NVF, no es siempre así. Si comparamos una “mala VF” con una “buena fachada sin cámara, o una buena NVF” podemos encontrar muchos casos que la fachada ventilada funcione peor. Esto nos demuestra que hay parámetros que, no solo pueden tener mucha influencia, sino que pueden hacer que dicha fachada ventilada funcione peor que algunas fachadas no ventiladas o sin cámara.



**Figura 68:** Esquema situando en la figura anterior diversos ejemplos de fachadas NVF o SC (en azul) que funcionan mejor que algunas VF (en rojo). Fuente: elaboración propia









Por lo tanto, no podremos considerar que una fachada ventilada sea siempre mejor que una fachada sin cámara o con cámara no ventilada, sino que deberá estar bien diseñada, ejecutada y tener un buen mantenimiento, y tener en cuenta la influencia de todos sus parámetros definitorios.












### 7.7. Análisis de resultados 4

Sería muy interesante realizar un estudio pormenorizado de todas las diferencias de funcionamiento (incluyendo en las variaciones otros muchos parámetros, y además combinándolos entre ellos), pero por su volumen queda fuera de este TFM y será parte de una futura Tesis Doctoral. De todas formas, sí que quiero hacer algún comentario sobre la influencia de algunos parámetros según los cálculos realizados.

Se analiza el efecto particular de cada uno de los parámetros sobre el funcionamiento global, se valora si este efecto es positivo o negativo en cada una de las situaciones climáticas estudiadas y se da un orden de magnitud del 0 al 5 en función de si es un parámetro cuya variación afecta mucho o poco al funcionamiento de la fachada.

Considero que lo que interesa destacar en este apartado es una jerarquización y orden de magnitud general de cada parámetro, más que una comparación muy exacta de estas dos situaciones concretas, pues cualquier cambio en los parámetros climáticos del cálculo haría variar ligeramente estos valores, haciéndonos perder la visión global. Por este motivo no he creído conveniente ser muy preciso en esta comparación, sino que he abogado por hacerlo de una manera gráfica y clara.

	FACHADA SOLEADA EN VERANO		INVIERNO NOCHE DESPEJADA	
	EFFECTO	GRADO	EFFECTO	GRADO
<b>Color</b>  Relación con radiación de onda corta: oscuro, más captación y más ganancias; claro, menos captación y menos ganancias.	oscuro    claro  	  ●●●●●		  ○○○○○○
<b>Transmitancia térmica <math>U_{12}</math></b>  Una menor $U_{12}$ reduce el valor absoluto del flujo energético a través de la hoja exterior.	menor $U_{12}$  	 ●○○○○○	menor $U_{12}$  	 ●○○○○○
<b>Emisividad <math>\epsilon_1</math></b>  Una menor emisividad $\epsilon_1$ supone una reducción de las pérdidas por emisión infrarroja de $M_1$ hacia el exterior.	menor $\epsilon_1$  	 ●●●○○○	menor $\epsilon_1$  	 ●●○○○○
<b>Emisividad <math>\epsilon_2</math></b>  Una menor emisividad $\epsilon_2$ supone un menor intercambio por infrarrojos entre $M_2$ y $M_3$ .	menor $\epsilon_2$  	 ●●○○○○	menor $\epsilon_2$  	 ●●○○○○

<p><b>Transmitancia térmica <math>U_{35}</math></b></p> <p>Una menor <math>U_{35}</math> reduce el valor absoluto del flujo a través de la fachada.</p>	<p>menor <math>U_{35}</math></p> <p></p>	<p>●●●●●</p>	<p>menor <math>U_{35}</math></p> <p></p>	<p>●●●●●</p>
<p><b>NVF / Fachada sin cámara</b></p> <p>La presencia de cámara de aire no ventilada (comparada con una fachada sin cámara) aumenta la <math>U</math> global, por lo que reduce el valor absoluto del flujo a través de la fachada.</p>	<p>cámara NV</p> <p></p>	<p>●○○○○</p>	<p>cámara NV</p> <p></p>	<p>●●●○○</p>
<p><b>Variación del espesor de cámara en NVF</b></p> <p>La <math>U</math> global es prácticamente la misma, por lo que casi no tiene afectación.</p>		<p>○○○○○</p>		<p>○○○○○</p>
<p><b>VF / NVF</b></p> <p>La cámara ventilada supone la evacuación de parte de la energía acumulada en la cámara.</p>	<p>VF</p> <p></p>	<p>●●●●●</p>	<p>VF</p> <p></p>	<p>●○○○○</p>
<p><b>VF / Fachada sin cámara</b></p> <p>Supone la evacuación de parte de la energía acumulada en la cámara. Aun así, en invierno sigue siendo positiva, en muchos casos, comparada con una fachada sin cámara.</p>	<p>VF</p> <p></p>	<p>●●●●●</p>	<p>VF</p> <p></p>	<p>●●●○○</p>
<p><b>Variación del espesor de cámara en VF</b></p> <p>Una cámara más ancha ofrece menos resistencia al flujo de aire, por lo que puede ventilar más y disipar mejor el calor</p>	<p>mayor</p> <p></p>	<p>●●●●●</p>		<p>○○○○○</p>
<p><b>Viento</b></p> <p>En verano, el viento tiene más afectación para <math>\epsilon_1</math> bajas, ya que puesto que en estos casos <math>T_1</math> es mayor que para <math>\epsilon_1</math> altas, las pérdidas de <math>M_1</math> por convección son mayores.</p> <p>En invierno dependerá del entorno, ya que si es una fachada con mucha visión de cielo, muy frío, puede tener muchas pérdidas por infrarrojos, haciendo que la temperatura superficial sea inferior a la del aire. De esta manera el viento puede hacer subir la temperatura superficial, y ser por lo tanto un parámetro positivo. El caso estudiado es un ejemplo de esta situación. En otros casos será negativo por suponer una pérdida de la energía acumulada en la cámara.</p>	<p>viento</p> <p></p>	<p>●○○○○</p>	<p>viento</p> <p></p>	<p>○○○○○</p>

## 8. CONCLUSIONES

**Aparte del grado de perforación de la hoja exterior hay otros parámetros que afectan al funcionamiento energético de la FV.**

Esto demuestra la hipótesis de partida que afirma que la metodología de cálculo propuesta por el CTE obvia parámetros que son relevantes y afectan al funcionamiento energético de la fachada ventilada.

Algunos de estos parámetros son:

- Distribución de las aberturas de la hoja exterior
- Color de la cara exterior del aplacado
- Espesor de la cámara

En relación a este último parámetro es importante destacar que **cámaras muy estrechas o con estrangulamientos pueden hacer que el aire de la cámara no se mueva suficiente y no sea capaz de disipar el calor.**

Una mala combinación de estos parámetros puede hacer que la fachada ventilada tenga un flujo energético mayor que una fachada no ventilada o sin cámara bien diseñada. Por ello, en verano, **la fachada ventilada sólo podrá garantizar menos ganancias que las fachadas no ventiladas o las fachadas sin cámara, si está bien diseñada, ejecutada y tiene un mantenimiento adecuado.**

Estas conclusiones evidencian la necesidad de realizar un estudio amplio y complejo, contrastado con mediciones reales, para acabar de acotar la influencia de cada uno de estos valores y de la combinación entre ellos. Este es uno de los temas que me gustaría desarrollar en mis estudios de Doctorado.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Paricio Ansuategui y C. Pardal March, «Añagazas de la fachada ventilada: ¿pluvial o revestida?,» *Palimpsesto*, nº 9, p. 5, 2014.
- [2] K. Suresh Kumar, «Pressure equalization of rainscreen walls: a critical review,» *Building and Environment*, nº 35, 2000.
- [3] C. Marinosci, P. Strachan, G. Semprini y G. Morini, «Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen façade building,» *Energy and Buildings*, nº 43, 2011.
- [4] M. Ciampi, F. Leccese y G. Tuoni, «Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings,» *Solar Energy*, nº 75, 2003.
- [5] A. Gagliano, F. Nocera y S. Aneli, «Thermodynamic analysis of ventilated façades under different wind conditions in summer period,» *Energy and Buildings*, nº 122, 2016.
- [6] C. Sanjuan, M. J. Suárez, E. Blanco y M. d. R. Heras, «Development and experimental validation of a simulation model for open joint ventilated façades,» *Energy and Buildings*, nº 43, 2011.
- [7] C. Sanjuan, M. J. Suárez, M. González, J. Pistono y E. Blanco, «Energy performance of an open-joint ventilated façade compared with a conventional sealed cavity façade,» *Solar Energy*, nº 85, 2011.
- [8] M. J. Suárez, C. Sanjuan, A. J. Gutiérrez, J. Pistono y E. Blanco, «Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated façade,» *Applied Thermal Engineering*, nº 37, 2012.
- [9] C. Aparicio Fernández, «Revestimientos ventilados en la arquitectura contemporánea. Influencia del diseño constructivo y su entorno en el comportamiento térmico.,» 2010.
- [10] J. Balter, C. Pardal, H. Coch, I. Paricio y C. Ganem, «Movimiento del aire en la cámara de la Fachada Ventilada. Estudio de casos existentes en la ciudad de Barcelona, España.,» de *Encontro Nacional e Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC/ELACAC)*, Camboriú, Brasil, 2017.
- [11] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja; Ministerio de Fomento, «Código Técnico de la Edificación, documento básico de Ahorro de Energía (CTE-DB-HE),» 2013-2016.
- [12] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja; Ministerio de Fomento, «Código Técnico de la Edificación, documento básico de Seguridad en caso de Incendio (CTE-DB-SI),» 2010-2016.
- [13] «Ordenança Reguladora de les Condicions de Protecció Contra Incendis,» *Butlletí Oficial de la Província de Barcelona*, nº 83, pp. 38-45, 5 Abril 2008.
- [14] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja; Ministerio de Fomento, «Código Técnico de la Edificación, documento básico de Salubridad (CTE-DB-HS),» 2009-2016.

- [15] M. Bento Fernández, «Los sistemas de cerramiento de fachadas ventiladas y el CTE,» *conarquitectura*, nº 35, pp. 73-83, 2010.
- [16] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja; Ministerio de Fomento, «Código Técnico de la Edificación, documento de apoyo al documento básico de Ahorro de Energía (CTE-DB-HE), Cálculo de parámetros característicos de la envolvente,» 2015.
- [17] M. Bento Fernández, «El marcatge CE dels kits de revestiment de façana,» *L'informatiu del CAATEEB*, nº 114, 2012.
- [18] European Organisation for Technical Approvals, «ETAG 034: Kits for external wall claddings. Part I: Ventilated cladding kits comprising cladding components and associated fixings.,» 2012.
- [19] C. Aparicio-Fernández, J.-L. Vivancos, P. Ferrer-Gisbert y R. Royo-Pastor, «Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation,» *Applied Thermal Engineering*, nº 66, 2014.
- [20] E. Giancola, C. Sanjuan, E. Blanco y M. Heras, «Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate,» *Energy and Buildings*, nº 54, 2012.
- [21] C. Marinosci, G. Semprini y G. Morini, «Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen façade building,» *Energy and Buildings*, nº 72, 2014.
- [22] K. Suresh Kumar, T. Stathopoulos y J. Wisse, «Field measurement data of wind loads on rainscreen walls,» *Journal of Wind Engineering*, nº 91, 2003.
- [23] C. Sanjuan, M. N. Sánchez, M. d. R. Heras y E. Blanco, «Experimental analysis of natural convection in open joint ventilated façades with 2D PIV,» *Building and Environment*, nº 46, 2011.
- [24] A. Domínguez Delgado, P. Duránd Neyra y C. A. Dominguez Torres, «Estudio del enfriamiento pasivo por fachadas ventiladas en el sur de España,» de *I Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-eficientes*, Sevilla, 2013.
- [25] C. Suárez y J. Molina, «Análisis del efecto chimenea en fachadas ventiladas opacas mediante correlaciones del flujo másico inducido. Aplicación para el dimensionado de anchos de cámara».
- [26] M. S. Dogget y R. F. Brunjes, «Simulation of Convective Heat Loss through Mineral Wool in a Rainscreen Facade,» Built Environments, Inc., Stillwater, Minnesota, USA, 2016.
- [27] C. Suárez, P. Joubert, J. L. Molina y F. J. Sánchez, «Heat transfer and mass flow correlations for ventilated facades,» *Energy and Buildings*, nº 43, 2011.
- [28] F. Flourentzou, J. Van der Maas y C.-A. Roulet, «Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients,» *Energy and Buildings*, nº 27, 1998.

- [29] F. Marques da Silva, M. Glória Gomes y A. Moret Rodrigues, «Measuring and estimating airflow in naturally ventilated double skin facades,» *Building and Environment*, nº 87, 2015.
- [30] «facad3s.net,» 2016. [En línea]. Available: <http://facad3s.net/>. [Último acceso: 09 Junio 2017].
- [31] C. Pardal March, «La hoja interior de la fachada ventilada. Análisis taxonomía y prospectiva,» 2009.
- [32] K. Ong, «A mathematical model of a solar chimney,» *Renewable Energy*, nº 28, 2003.
- [33] P. A. Tipler y G. Mosca, Física para la ciencia y la tecnología, Vols. %1 de %21: Mecánica, oscilaciones y ondas, termodinámica, Editorial Reverté, 2010.
- [34] V. Escobar Ruiz, «Parámetros de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para clima cálido humedo en Tabasco.,» 2013.
- [35] F. P. Incropera, T. L. Bergman, A. S. Lavine y D. P. Dewitt, Fundamentals of heat and mass transfer, Jefferson City: John Wiley & Sons, 2011.
- [36] M. Santamouris y D. Asimakopoulous, Passive cooling of buildings, London: James & James (Science Publishers) Ltd., 1996.
- [37] A. Athienitis y M. Santamouris, Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings, London: James & James (Science Publishers) Ltd., 2002.
- [38] European Organisation for Technical Approvals, «ETAG 034: Kits for external wall claddings. Part II: Cladding kits comprising cladding components, associated fixings, subframe and possible insulation layer,» 2012.
- [39] European Organisation for Technical Approvals, «EAD: Kits for external wall claddings made of agglomerated stone,» 2016.
- [40] «Ulma Architectural Solutions,» [En línea]. Available: <http://www.ulmaarchitectural.com/es/fachadas-ventiladas/proyectos/residenciales/>. [Último acceso: 18 Junio 2017].
- [41] «B01 arquitectes,» [En línea]. Available: [http://www.b01arquitectes.com/arc\\_project/seu-social-de-carbuos-metalicos-s-a/](http://www.b01arquitectes.com/arc_project/seu-social-de-carbuos-metalicos-s-a/). [Último acceso: 31 Marzo 2017].
- [42] «El blog de Knauf,» [En línea]. Available: <http://blog.knauf.es/la-proteccion-al-fuego-en-la-edificacion-2/>. [Último acceso: 29 Agosto 2017].
- [43] «Porcelanosa Grupo, sistemas constructivos,» [En línea]. Available: <http://www.porcelanosa.com/sistemas-constructivos.php>. [Último acceso: 19 Junio 2017].
- [44] «Slideshare - Envolvertes fachada ventilada Butech,» [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/FundacionLaboral/rehabilitacin-energtica-fachadas-ventiladas>. [Último acceso: 19 Junio 2017].

- [45] «Trespa,» [En línea]. Available: [http://www.trespa.info/Images/codigoS3071\\_Juntas\\_version2.0\\_fecha11-05-2011\\_tcm37-43675.pdf](http://www.trespa.info/Images/codigoS3071_Juntas_version2.0_fecha11-05-2011_tcm37-43675.pdf). [Último acceso: 18 Junio 2017].
- [46] H. Arquitectes, «Jaume Prat,» [En línea]. Available: <http://jaumeprat.com/ca/harquitectes-casa-1101/>. [Último acceso: 23 Agosto 2017].
- [47] A. Goula, «Adrià Goula Photo,» [En línea]. Available: <http://www.adriagoula.com/es/photos-commissioned-work/casa-1101.html>. [Último acceso: 23 Agosto 2017].
- [48] Ó. C. Sánchez, «Flickr,» [En línea]. Available: <https://www.flickr.com/photos/derkenuke/4237828256/>. [Último acceso: 18 Junio 2017].
- [49] M. Lulko, «Flickr,» [En línea]. Available: <https://www.flickr.com/photos/lulek/14748034804/>. [Último acceso: 18 junio 2017].
- [50] P. Guthrie, «Flickr,» [En línea]. Available: <https://www.flickr.com/photos/pg/8047320064/>. [Último acceso: 18 Junio 2017].
- [51] J. Zacherle, «Flickr,» [En línea]. Available: <https://www.flickr.com/photos/jkz/2475358486/>. [Último acceso: 18 Junio 2017].